

การศึกษารองของล้อยืดระโนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วในการเจียรระโนวัสดุผสมอะลูมินา-  
ไทเทเนียมคาร์ไบด์



นายสีบสกุล ยศพิทักษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Wear of vitrified bonded diamond grinding wheel during grinding of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -  
TiC composite materials

Mr. Suebsakul Yospitak



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical and Materials

Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสีกหรือของลื้อเจียรระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็น  
เนื้อแก้วในการเจียรระไนวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์  
ไบด์

โดย

นายสืบสกุล ยศพิทักษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ธชาชาย เหลืองวรานันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธชาชาย เหลืองวรานันท์)

..... กรรมการ  
(ดร.เชษฐา พันธุ์เครือบุตร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิติ ยงวณิชย์)



# # 5770327821 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORDS: GRINDING / DIAMOND WHEEL / CUP WHEEL / SPINDLE CURRENT

SUEBSAKUL YOSPITAK: Wear of vitrified bonded diamond grinding wheel during grinding of  $Al_2O_3$ -TiC composite materials. ADVISOR: ASSOC. PROF.TACHAI LUANGVARANUNT, Ph.D., 157 pp.

One of the most important processes for producing read-write slider of a hard disk from a fabricated  $Al_2O_3$ -TiC wafer is grinding process. The main purpose of this experiment is to study the wear behavior of grinding wheel, which are grinding wheel surface, spindle current during grinding, and workpiece surface roughness. The workpiece was  $Al_2O_3$ -TiC bar which was grinded using vitrified bonded SD1500 diamond cup wheel. In addition to wear behavior of grinding wheel, the effect of wheel dressing to morphology of wheel surface was investigated. Characterization of wheel surface was by measuring its surface roughness, using a profilometer. Its surface morphology was examined by SEM. The surface roughness of the work piece was measured by AFM. The spindle current during grinding was collected by grinding machine. The grinding produced work piece surface roughness in range of 20 to 30 nm. Surface roughness of grinding wheel decreased from initially dressed condition of 1.25  $\mu m$  to 1.08  $\mu m$ . As grinding pass number increases, wheel roughness decreases. Its surface is worn down and covered by swarf, and lost its flatness and uniformity. Workpieces have smoother surface with an increase of grinding passes. Grinding is more difficult as grinding continues, which can be seen by the increase of spindle current. Wheel self-sharpening was apparent at 85 of grinding passes. A dressing operation by one-pass grinding of white alumina dressing stick for a 10 mm distant is not sufficient to bring back the initially dressed surface condition of the wheel

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชาชาย เหลืองวรานันท์ ที่สละเวลาคอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้งานวิจัยนี้ผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่คอยให้ความรู้ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยชีววิทยาช่องปาก คณะทันตแพทยศาสตร์ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พีจิตติพงษ์ แดงดีบ ที่คอยให้ความรู้และอำนวยความสะดวกในการทำการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา รวมถึงขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ มหาบัณฑิตทุกท่าน

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และบุพพการีทุกท่านที่ได้อบรม และให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ฉ    |
| สารบัญ.....   | ช    |
| สารบัญภาพ .....   | ฑ    |
| สารบัญตาราง.....  | ต    |
| บทที่ 1 บทนำ .....  | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา .....   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....   | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา.....   | 2    |
| บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม .....   | 4    |
| 2.1 การเจียรระไน (Grinding).....  | 4    |
| 2.1.1 เครื่องเจียรระไน (Grinding machine).....                                    | 4    |
| 2.1.2 ล้อเจียรระไน (Grinding wheel).....  | 4    |
| 2.1.3 ชิ้นงาน (Workpiece).....  | 4    |
| 2.1.4 สารหล่อเย็น (Grinding fluid).....   | 4    |
| 2.1.5 บรรยากาศ (Atmosphere).....  | 4    |
| 2.1.6 เศษเจียรระไน (Grinding swarf).....  | 5    |
| 2.2 ประเภทของการเจียรระไน (Type of grinding).....                                 | 5    |
| 2.2.1 การเจียรระไนผิวราบตามเส้นรอบวง (Peripheral surface grinding).....           | 5    |
| 2.2.2 การเจียรระไนผิวทรงกระบอกตามเส้นรอบวง (Peripheral cylindrical grinding)..... | 5    |
| 2.2.3 การเจียรระไนผิวหน้าแบบราบ (Face surface grinding).....                      | 5    |

|   |    |
|---|----|
| 2.2.4 การเจียรระโนผิวหน้าแบบทรงกระบอก (Face cylindrical grinding).....              | 6  |
| 2.3 ล้อเจียรระโน (Grinding wheel).....  | 6  |
| 2.3.1 อนุภาคขัดสี (Abrasive grain) .....  | 7  |
| 2.3.1.1 เพชร (Diamond) .....  | 8  |
| 2.3.1.2 ขนาดอนุภาคของเพชร (Size of diamond).....                                    | 9  |
| 2.3.2 ตัวประสาน (Bond).....   | 11 |
| 2.3.2.1 ตัวประสานอินทรีย์ (Organic bonds) .....                                     | 11 |
| 2.3.2.2 ตัวประสานแก้ว (Vitrified bonds).....  | 11 |
| 2.3.2.3 ตัวประสานโลหะ (Metal bonds) .....   | 12 |
| 2.3.3 สัณฐานวิทยาของล้อเจียรระโน (Morphology) .....                                 | 12 |
| 2.4 พารามิเตอร์การเจียรระโนและการลับคม (Grinding and Dressing parameters) .....     | 13 |
| 2.5 วัสดุผสมอะลูมินา – ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiC)..... | 13 |
| 2.6 สารหล่อเย็น (Grinding fluid).....   | 14 |
| 2.7 ความหยาบผิว (Surface Roughness).....  | 14 |
| 2.7.1 ความหยาบผิวของชิ้นงาน (Workpiece surface roughness).....                      | 15 |
| 2.7.2 ความหยาบผิวของล้อเจียรระโน (Grinding wheel surface roughness).....            | 15 |
| 2.8 การลับคม (Dressing).....  | 16 |
| 2.9 การสึกหรอของล้อเจียรระโน (Wear of grinding wheel).....                          | 17 |
| 2.9.1 การสึกหรอของอนุภาคขัดสี (Wear of abrasive grain).....                         | 17 |
| 2.9.1.1 การเสียคม (Flattening).....   | 17 |
| 2.9.1.2 การแตกหักของอนุภาคขัดสี (Microcrystalline grain splintering) .....          | 17 |
| 2.9.1.3 การหลุดออกบางส่วนของอนุภาคขัดสี (Partial grain break-off) .....             | 18 |
| 2.9.1.4 การหลุดออกของอนุภาคขัดสี (Grain break-out).....                             | 18 |



|   |    |
|---|----|
| 2.9.2 การสึกหรอของตัวประสาน (Bond wear).....  | 19 |
| 2.10 การประเมินการสึกหรอของล้อเจียรไน (Wheel wear assessment).....                                      | 20 |
| บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง .....  | 22 |
| 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำการทดลอง.....   | 22 |
| 3.1.1 ล้อเจียรไน .....  | 22 |
| 3.1.2 อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....   | 22 |
| 3.1.3 อุปกรณ์สำหรับเตรียมล้อเจียรไนก่อนตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....              | 23 |
| 3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....  | 23 |
| 3.2 วิธีการทดลอง.....   | 23 |
| 3.2.1 การเตรียมล้อเจียรไนเพื่อดูสัณฐานวิทยา .....   | 23 |
| 3.2.1.1 การเตรียมล้อเจียรไนเพื่อดูสัณฐานวิทยาแบบปกติ .....  | 24 |
| 3.2.1.2 การเตรียมล้อเจียรไนเพื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนที่ผ่านการกัดกรด .....                   | 24 |
| 3.2.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....                   | 24 |
| 3.2.2.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนแบบปกติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....          | 24 |
| 3.2.2.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนที่ผ่านการกัดกรดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ..... | 25 |
| 3.2.3 การวัดความหยาบผิวของล้อเจียรไนโดยเครื่องวัดความหยาบผิว profilometer .....                         | 25 |
| 3.2.4 การเจียรไนและการลับคม .....   | 25 |
| 3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....   | 26 |
| 3.3.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อดูสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนแบบปกติ.....  | 26 |

|  |    |
|--|----|
| 3.3.2 ขั้นตอนการทดลองเพื่อพิสูจน์ฐานวิทยาของล้อยืดระไนแบบปกติที่ผ่านการกัดกรด....  | 29 |
| 3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....   | 30 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย .....  | 31 |
| 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้ว .....  | 31 |
| 4.2 ฐานวิทยาของล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่สภาวะต่าง ๆ .....  | 31 |
| 4.2.1 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่ได้รับมา (As-received).....   | 31 |
| 4.2.2 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมครั้งแรก (initial dress).....  | 32 |
| 4.2.3 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (15 passes) .....                   | 33 |
| 4.2.4 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (15 & dress)..... | 35 |
| 4.2.5 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (30 passes) .....                   | 36 |
| 4.2.6 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (30 & dress)..... | 37 |
| 4.2.7 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา - ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น (45 passes) .....                 | 38 |
| 4.2.8 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น (45 & dress).....     | 39 |
| 4.3 ฐานวิทยาของล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่สภาวะต่าง ๆ ที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้ว.....                          | 40 |
| 4.3.1 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมครั้งแรก .....   | 40 |
| 4.3.2 ล้อยืดระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น .....                               | 41 |

|  |    |
|--|----|
| 4.3.3 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-<br>ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น .....                                     | 42 |
| 4.3.4 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-<br>ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น .....                                     | 43 |
| 4.4 โพรไฟล์และความหยาบผิวของล้อเจียร์ไน.....   | 44 |
| 4.4.1 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่ได้รับมา (as-received).....  | 44 |
| 4.4.2 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมครั้งแรก (as-<br>dressed).....  | 45 |
| 4.4.3 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-<br>ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (15 passes) .....                         | 46 |
| 4.4.4 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมแบบปกติต่อจาก<br>การใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (15 & dress)..... | 47 |
| 4.4.5 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-<br>ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (30 passes) .....                         | 48 |
| 4.4.6 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมแบบปกติต่อจาก<br>การใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (30 & dress)..... | 49 |
| 4.4.7 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-<br>ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น (45 passes) .....                         | 50 |
| 4.4.8 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมแบบปกติต่อจาก<br>การใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น (45 & dress)..... | 51 |
| 4.4.9 เปรียบเทียบความหยาบผิวของล้อเจียร์ไนที่สภาวะต่าง ๆ.....  | 52 |
| 4.5 ความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ .....   | 55 |
| 4.5.1 ความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังถูกเจียร์ไนด้วยล้อเจียร์ไน<br>หลังลับคมครั้งแรก 15 ชั้น .....                                    | 55 |
| 4.5.2 ความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังถูกเจียร์ไนด้วยล้อเจียร์ไน<br>หลังการลับคมแบบปกติ 30 ชั้น .....                                  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| 4.5.3 ความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังถูกเจียรระโนด้วยเจียรระโนหลัง<br>การลับคมแบบปกติ 45 ขึ้น.....  | 58 |
| 4.6 กระแสของมอเตอร์.....   | 60 |
| 4.6.1 กระแสของมอเตอร์ขณะเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ขึ้น.....   | 60 |
| 4.6.2 กระแสของมอเตอร์ขณะเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ขึ้น.....   | 61 |
| 4.6.3 กระแสของมอเตอร์ขณะเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ขึ้น.....   | 62 |
| 4.7 อภิปรายผลการทดลอง.....   | 64 |
| 4.7.1 การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของล้อยเจียรระโน.....   | 65 |
| 4.7.1.1 ล้อยเจียรระโนที่ได้รับมา.....  | 65 |
| 4.7.1.2 ล้อยเจียรระโนหลังลับคมครั้งแรก.....  | 65 |
| 4.7.1.3 ล้อยเจียรระโนหลังใช้เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ขึ้น.....   | 66 |
| 4.7.1.4 ล้อยเจียรระโนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียม<br>คาร์ไบด์ 15 ขึ้น.....   | 67 |
| 4.7.1.5 ล้อยเจียรระโนหลังใช้เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ขึ้น.....   | 68 |
| 4.7.1.6 ล้อยเจียรระโนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรระโนอะลูมินา-<br>ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ขึ้น.....  | 69 |
| 4.7.1.7 ล้อยเจียรระโนหลังใช้เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ขึ้น.....   | 69 |
| 4.7.1.8 ล้อยเจียรระโนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรระโนอะลูมินา-<br>ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ขึ้น.....  | 70 |
| 4.7.2 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....  | 71 |
| 4.7.2.1 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ที่ถูกเจียรระโนด้วยล้อยเจียรระโน<br>หลังลับคมครั้งแรก.....   | 71 |
| 4.7.2.2 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ขึ้นที่ถูกเจียรระโนด้วยล้อย<br>เจียรระโนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียม<br>คาร์ไบด์ 15 ขึ้น..... | 71 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.7.2.3 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นที่ถูกเจียรระไนด้วยล้อ<br>เจียรระไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียม<br>คาร์ไบด์ 30 ชั้น..... | 72  |
| 4.7.3 พฤติกรรมการสึกหรอของล้อเจียรระไน (Wheel wear mechanism).....  | 73  |
| 4.7.3.1 การสึกหรอช่วงแรก (Initial wear region) .....  | 73  |
| 4.7.3.2 การสึกหรอช่วงคงที่ (Steady wear region) .....   | 73  |
| 4.7.3.3 การสึกหรอช่วงถดถอย (Deteriorate wear region).....   | 74  |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....   | 75  |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง .....  | 75  |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....  | 76  |
| รายการอ้างอิง .....   | 77  |
| ภาคผนวก.....  | 79  |
| ภาคผนวก ก .....   | 80  |
| ภาคผนวก ข .....   | 132 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....  | 157 |

## สารบัญภาพ

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| ภาพที่ 2.1  | หกองค์ประกอบหลักที่เกี่ยวข้องกับการเจียรระไน .....  | 5  |
| ภาพที่ 2.2  | ประเภทของการเจียรระไนแบบต่างๆ (ก) Peripheral surface grinding, (ข) Peripheral cylindrical grinding, (ค) Face surface grinding และ (ง) Face cylindrical grinding .....   | 6  |
| ภาพที่ 2.3  | รูปร่างมาตรฐานสากลของล้อเจียรระไนแบบต่างๆ .....   | 7  |
| ภาพที่ 2.4  | สัณฐานวิทยาของล้อเจียรระไนที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ที่มีแก้วเป็นตัวประสาน, (ข) ภาพจำลอง .....   | 12 |
| ภาพที่ 2.5  | วิธีการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต .....   | 15 |
| ภาพที่ 2.6  | ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดความหยาบผิว .....  | 15 |
| ภาพที่ 2.7  | ความหยาบผิวของล้อเจียรระไนต่ออัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ .....  | 16 |
| ภาพที่ 2.8  | binary image ก่อนลบคม (ซ้าย) และหลังลบคม (ขวา) .....  | 17 |
| ภาพที่ 2.9  | การสึกหรอของอนุภาคขัดสี Flattening (ซ้าย) และ Micro splintering (ขวา) .....   | 17 |
| ภาพที่ 2.10 | การสึกหรอของอนุภาคขัดสี Partial grain break-off (ซ้าย) และ Grain break-out (ขวา) .....  | 18 |
| ภาพที่ 2.11 | สัณฐานวิทยาของอนุภาคเพชรที่สภาวะต่างๆ (a) as-dressed, (b), (c), (d), (e) หลังจากเจียรระไนชิ้นงานไป 2.1, 4.2, 7.4, 10.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ .....   | 19 |
| ภาพที่ 2.12 | การสึกหรอของตัวประสาน insufficient bond wear (ซ้าย) และ Suitable bond wear (ขวา) .....  | 20 |
| ภาพที่ 3.1  | ภาพตัดขวางลักษณะของล้อเจียรระไน .....   | 22 |
| ภาพที่ 3.2  | ภาพจำลองลักษณะของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....  | 23 |
| ภาพที่ 3.3  | ลักษณะการเตรียมล้อเจียรระไนเพื่อคู่สัณฐานวิทยา และโปรไฟล์.....  | 24 |
| ภาพที่ 4.1  | สัณฐานวิทยาของล้อเจียรระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่ได้รับมาที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตำแหน่งที่หนึ่งที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ก) บริเวณที่หนึ่ง, ข) บริเวณที่สอง, ค) บริเวณที่สาม และ ง) บริเวณที่สี่..... | 32 |



กราด ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ข) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า,  
 ค) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ ง) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า..... 40

**ภาพที่ 4.10** สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไน  
 อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้นที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วและตรวจสอบด้วยกล้อง  
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ข) ตำแหน่งที่  
 สอง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ค) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ ..... 41

**ภาพที่ 4.11** สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไน  
 อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วและตรวจสอบด้วยกล้อง  
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ข) ตำแหน่งที่  
 สอง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ค) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ ..... 42

**ภาพที่ 4.12** สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไน  
 อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วและตรวจสอบด้วยกล้อง  
 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ข) ตำแหน่งที่  
 สอง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ค) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ ..... 43

**ภาพที่ 4.13** ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนที่ได้รับมาเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ..... 44

**ภาพที่ 4.14** ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนหลังการลับคมครั้งแรกเป็นระยะทาง ..... 45

**ภาพที่ 4.15** ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ..... 46

**ภาพที่ 4.16** ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนที่หลังการลับคมแบบปกติต่อจากการใช้ เจียรไน  
 อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น เป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง และ ข)  
 ตำแหน่งที่สอง ..... 47

**ภาพที่ 4.17** ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ..... 49

**ภาพที่ 4.18** ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-  
 ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง, ข) ตำแหน่งที่สอง,..... 50

**ภาพที่ 4.19** ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ..... 51

**ภาพที่ 4.20** ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนที่หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมิ  
 นา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง, ข) ตำแหน่งที่สอง.. 52

**ภาพที่ 4.21** ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของล้อยเจียรไนที่สภาวะต่าง ๆ..... 54



|             |   |    |
|-------------|---|----|
| ภาพที่ 4.22 | ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น.....  | 56 |
| ภาพที่ 4.23 | ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น.....  | 58 |
| ภาพที่ 4.24 | ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น.....  | 59 |
| ภาพที่ 4.25 | ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชิ้น .....                              | 61 |
| ภาพที่ 4.26 | ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชิ้น .....                              | 62 |
| ภาพที่ 4.27 | ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชิ้น .....                              | 64 |
| ภาพที่ 4.28 | ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรไนที่ได้รับมา.....   | 65 |
| ภาพที่ 4.29 | ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรก .....  | 66 |
| ภาพที่ 4.30 | ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรไนหลังใช้เจียรไน อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น .....                    | 67 |
| ภาพที่ 4.31 | ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น.....    | 67 |
| ภาพที่ 4.32 | ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรไนหลังใช้เจียรไน อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น .....                    | 68 |
| ภาพที่ 4.33 | ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น..... | 69 |
| ภาพที่ 4.34 | ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น..... | 69 |
| ภาพที่ 4.35 | ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น..... | 70 |
| ภาพที่ 4.36 | ภาพจำลองการสึกหรอช่วงแรกของล้อเจียรไน .....   | 73 |
| ภาพที่ 4.37 | ภาพจำลองการสึกหรอช่วงคงที่ของล้อเจียรไน .....   | 73 |
| ภาพที่ 4.38 | ภาพจำลองการสึกหรอของล้อเจียรไนช่วงถดถอย .....   | 74 |

## สารบัญตาราง

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| ตารางที่ 2.1 | ค่าความแข็งของอนุภาคชนิดสี่ประเภทต่างๆ .....  | 8  |
| ตารางที่ 2.2 | คุณสมบัติด้านความร้อนของอนุภาคชนิดสี่ .....   | 8  |
| ตารางที่ 2.3 | ขนาดของอนุภาคเพชรในแต่ละหน่วย .....   | 9  |
| ตารางที่ 2.4 | พารามิเตอร์การเจียรไน .....   | 13 |
| ตารางที่ 2.5 | การประเมินการสึกหรอแบบต่างๆ .....   | 20 |
| ตารางที่ 3.1 | ลักษณะของล้อเจียรไน.....  | 22 |
| ตารางที่ 3.2 | คุณสมบัติและลักษณะของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....  | 23 |
| ตารางที่ 3.3 | พารามิเตอร์การวัดความหยาบผิวโดย profilometer .....  | 25 |
| ตารางที่ 3.4 | พารามิเตอร์สำหรับการเจียรไน.....  | 25 |
| ตารางที่ 3.5 | พารามิเตอร์สำหรับการลับคม .....   | 26 |
| ตารางที่ 4.1 | ส่วนผสมทางเคมีของล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้ว .....                                 | 31 |
| ตารางที่ 4.2 | ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของล้อเจียรไนที่สภาวะต่าง ๆ ทั้งสี่ตำแหน่ง.....                                 | 53 |
| ตารางที่ 4.3 | ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรก..... | 55 |
| ตารางที่ 4.4 | ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยล้อเจียรไนหลังการลับคม.....                    | 56 |
| ตารางที่ 4.5 | แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยล้อเจียรไนหลังการลับคม.....                | 58 |
| ตารางที่ 4.6 | ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชิ้น.....                         | 60 |
| ตารางที่ 4.7 | ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชิ้น.....                         | 61 |
| ตารางที่ 4.8 | ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชิ้น.....                         | 63 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ฮาร์ดดิสก์เป็นอุตสาหกรรมที่สร้างรายได้ให้แก่ประเทศเป็นอันดับต้นๆ เนื่องจากการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลได้กลายมาเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญ และนิยมใช้กันมาก เพราะคุณสมบัติหลายประการที่เป็นข้อได้เปรียบมากกว่าการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบอื่น เช่น ประหยัดพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล, ความสะดวกในการเคลื่อนย้ายข้อมูล, การเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เป็นต้น กระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์หลักๆ สามารถจำแนกได้ดังนี้ การผลิตแผ่นเวเฟอร์ (Wafer fabrication), กระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนข้อมูล (HGA-Head Gimble Assembly), กระบวนการผลิตชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (HGA-Head stack Assembly) และกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive Assembly) [1, 2] กระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลโดยตรงต่อความเร็วในการอ่านหรือเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์คือกระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนข้อมูล

หนึ่งในกระบวนการที่สำคัญในการผลิตหัวอ่าน-เขียนข้อมูล คือ ขั้นตอนการเจียรระไน (Grinding) วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ( $Al_2O_3-TiC$ ) หรือ อัลทิก (ALTiC) ที่มีรูปร่างลักษณะเป็นสไลเดอร์บาร์ (Slider bar) และมีแผงวงจรทางไฟฟ้าอยู่บนเนื้อวัสดุ ด้วยล้อเจียรระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้ว (Vitrified bonded diamond grinding wheel) ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักที่สำคัญ เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่มีการกำจัดเนื้อวัสดุ, ควบคุมความเรียบผิว (Surface roughness), ควบคุมความโค้งงอ (Slider bow) และควบคุมมิติ (Dimension) ของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์เพื่อให้ได้ค่าต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นตามที่ต้องการ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน (ความเรียบผิว, ความโค้งงอ, และมิติของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์) ในขั้นตอนการเจียรระไนสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มหลัก ได้แก่

1. ล้อเจียรระไน (Grinding wheel) ได้แก่ รูปร่างของล้อเจียรระไน, การสึกหรอของล้อเจียรระไน, ประเภทของอนุภาคขัดสี (Abrasive grain) บนล้อเจียรระไน และ ประเภทของตัวประสาน
2. พารามิเตอร์ทั้งหมดของในการเจียรระไน เช่น ความเร็วของล้อเจียรระไน (Wheel speed), อัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed rate), ความลึกของการเจียรระไน (Grinding depth) เป็นต้น
3. คุณสมบัติของวัสดุที่ถูกเจียรระไน (Workpiece material) เช่น ความแข็ง, ขนาดเกรน, ขนาดของวัสดุที่ถูกเจียรระไน เป็นต้น

4. การลับคม (Dressing) ได้แก่ ประเภทของหินลับคม, ความเร็วของล้อเจียรระโนขณะลับคม, ความลึกของการลับคม เป็นต้น

5. สารหล่อเย็น (Grinding fluid) ได้แก่ อัตราการไหล, ความเร็ว, แรงดัน เป็นต้น

หากสามารถเข้าใจปัจจัยทั้งหมดที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงานได้ก็สามารถประยุกต์ความรู้ที่ได้เพื่อแก้ปัญหาต่อสถานการณ์ใหม่ๆ ได้โดยไม่ต้องลองผิดลองถูก หรือพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศที่อาจต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูง จากที่กล่าวมาข้างต้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงาน (ในที่นี้จะพิจารณาแค่ความหยาบผิว) โดยจะทำการศึกษาและทำการทดลองร่วมกับบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด แต่เนื่องจากการศึกษาปัจจัยทั้งหมดนั้นเป็นไปได้ยากและขัดขวางกระบวนการผลิตของบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ดังนั้นจึงเลือกศึกษาปัจจัยที่สำคัญๆ ได้แก่ การสึกหรอของล้อเจียรระโน และการลับคมล้อเจียรระโน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของล้อเจียรระโนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วในการเจียรระโนวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

1.2.2 เพื่อศึกษาสัญญาณวิทยาของล้อเจียรระโนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคม

1.2.3 เพื่อศึกษาสัญญาณวิทยาของล้อเจียรระโนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วต่อความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังถูกเจียรระโน และกระแสของมอเตอร์ขณะเจียรระโน

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาสัญญาณวิทยาของล้อเจียรระโนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ ล้อเจียรระโนที่ได้รับมา, หลังการลับคม, หลังใช้เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15, 30 และ 45 ชั้น ภายใต้สมมติฐานว่าการกระจายตัวของอนุภาคขัดสีบนล้อเจียรระโนสม่ำเสมอ และมีปริมาณตัวประสานเท่าๆ กันทุกบริเวณ

1.3.2 ศึกษาความหยาบผิวของล้อเจียรระโนโดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิว (Profilometer) ลากผ่านตำแหน่งเดิมบนผิวของล้อเจียรระโนที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ ล้อเจียรระโนที่ได้รับมา, หลังการลับคม, หลังใช้เจียรระโนชิ้นงาน 15, 30 และ 45 ชั้น

1.3.3 ศึกษาความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ผ่านการเจียรระโนทั้ง 3 สภาวะคือ 15, 30 และ 45 ชั้นเพื่อดูคุณภาพของการเจียรระโน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)

1.3.4 ศึกษากระแสของมอเตอร์ขณะเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ วัดโดยตั้งโปรแกรมให้เครื่องเจียรระโนเก็บข้อมูลกระแสของมอเตอร์ขณะเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15, 30 และ 45 ชั้น

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจพฤติกรรมการสึกหรอของล้อเจียรระโนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วในการเจียรระโนวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

1.4.2 เข้าใจสัณฐานวิทยาของล้อเจียรระโนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่เกิดขึ้นหลังการลับคม

1.4.3 สามารถนำผลการทดลองไปประยุกต์ใช้ปรับพารามิเตอร์ในการเจียรระโนในกระบวนการผลิตจริงเพื่อเพิ่มคุณภาพการผลิต



## บทที่ 2

### ปรีทรรศน์วรรณกรรม

#### 2.1 การเจียรระไน (Grinding)

การเจียรระไน คือ กระบวนการขัดหรือกำจัดเนื้อวัสดุวัสดุเพื่อให้ได้ลักษณะ และรูปร่างสุดท้ายตามที่ต้องการ ด้วยล้อเจียรระไนที่หมุนด้วยความเร็วสูง [3] องค์ประกอบหลักของการเจียรระไนสามารถแบ่งได้เป็น 6 ส่วนแสดงดังภาพที่ 2.1

##### 2.1.1 เครื่องเจียรระไน (Grinding machine)

เครื่องมือหลักที่ควบคุมกระบวนการเจียรระไน เช่น ความเร็วของล้อเจียรระไน, ความเร็วการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน, อัตราการป้อน เป็นต้น สิ่งที่สำคัญที่เครื่องเจียรระไนต้องมีคือ ความสะอาด เนื่องจากหากมีสิ่งสกปรกปนเปื้อนภายในเครื่องจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานได้ นอกจากนี้การออกแบบและการติดตั้งเครื่องเจียรระไนเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากจะส่งผลต่อการสิ้นสละเทือน และความแม่นยำ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพการเจียรระไนเช่นกัน

##### 2.1.2 ล้อเจียรระไน (Grinding wheel)

ชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่เจียรระไนชิ้นงาน ที่ถูกควบคุมโดยเครื่องเจียรระไน คุณสมบัติสำคัญของล้อเจียรระไนต้องมีคือ ความแข็งที่สูงกว่าชิ้นงานที่ถูกเจียรระไน ล้อเจียรระไนมีรูปร่างหลายแบบเช่น ทรงกระบอกกลาง, ทรงกระบอกตัน และรูปถ้วย เป็น

##### 2.1.3 ชิ้นงาน (Workpiece)

วัสดุที่ถูกเจียรระไน ในที่นี้อาจเป็นวัสดุอะไรก็ได้ สำหรับกระบวนการเจียรระไนชิ้นงานจะถูกขัดหรือถูกกำจัดเนื้อวัสดุออกโดยล้อเจียรระไน ความหนาผิวของชิ้นงานจะมีค่าขึ้นอยู่กับประเภทของล้อเจียรระไน และประเภทของการเจียรระไน

##### 2.1.4 สารหล่อเย็น (Grinding fluid)

ของเหลวผสมที่ใช้ขณะเจียรระไน โดยจุดประสงค์ของการใช้สารหล่อเย็นคือ ลดการสึกหรอของล้อเจียรระไน, ลดความร้อนของชิ้นงานที่เกิดขึ้น และชะล้างเศษเจียรระไนที่เกิดขึ้นขณะเจียรระไน

##### 2.1.5 บรรยากาศ (Atmosphere)

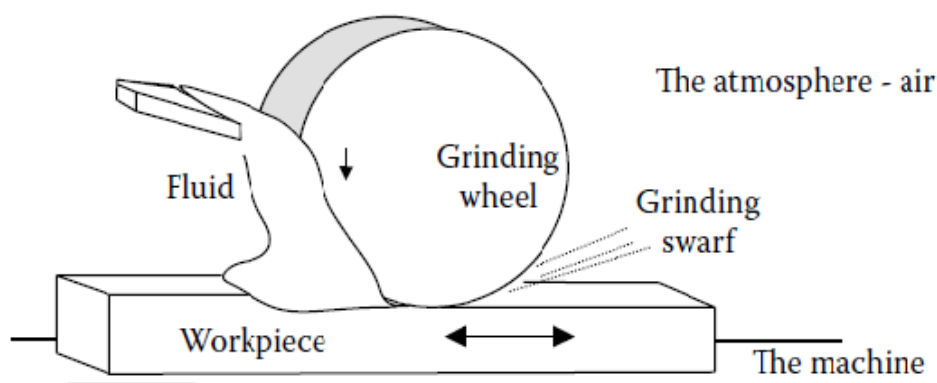
บรรยากาศขณะเจียรระไน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาหากทำการเจียรระไนโลหะ เนื่องจากโลหะหลังจากถูกเจียรระไนใหม่ๆ จะทำปฏิกิริยากับบรรยากาศได้ง่าย เนื่องมาจากสาเหตุดังนี้คือ

1. ผิวโลหะที่ถูกเจียรระไนใหม่ๆ จะทำปฏิกิริยากับอากาศได้ง่ายกว่าผิวโลหะเก่าที่เป็นสารประกอบออกไซด์อยู่แล้ว

2. อุณหภูมิที่สูงที่เกิดจากการเจียรระไนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการเกิดออกไซด์

### 2.1.6 เศษเจียรระไน (Grinding swarf)

เศษชิ้นส่วนที่หลุดออกขณะเจียรระไน อาจจะเป็นชิ้นงานหรือลื้อเจียรระไนก็ได้



ภาพที่ 2.1 หกองค์ประกอบหลักที่เกี่ยวข้องกับการเจียรระไน [3]

## 2.2 ประเภทของการเจียรระไน (Type of grinding)

การแบ่งประเภทของการเจียรระไนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบหลัก ได้แก่ การเจียรระไนผิวราบ และการเจียรระไนผิวทรงกระบอก โดยสามารถแบ่งย่อยได้ 4 แบบดังนี้

### 2.2.1 การเจียรระไนผิวราบตามเส้นรอบวง (Peripheral surface grinding)

การเจียรระไนผิวชิ้นงานที่มีลักษณะแบนราบ โดยชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่ได้ และลื้อเจียรระไนจะหมุนอยู่กับที่ ดังภาพที่ 2.2 ก) ขณะเจียรระไนผิวของชิ้นงานด้านที่ถูกเจียรระไนจะสัมผัสกับผิวของลื้อเจียรระไนตลอดตามความยาวของเส้นรอบวง

### 2.2.2 การเจียรระไนผิวทรงกระบอกตามเส้นรอบวง (Peripheral cylindrical grinding)

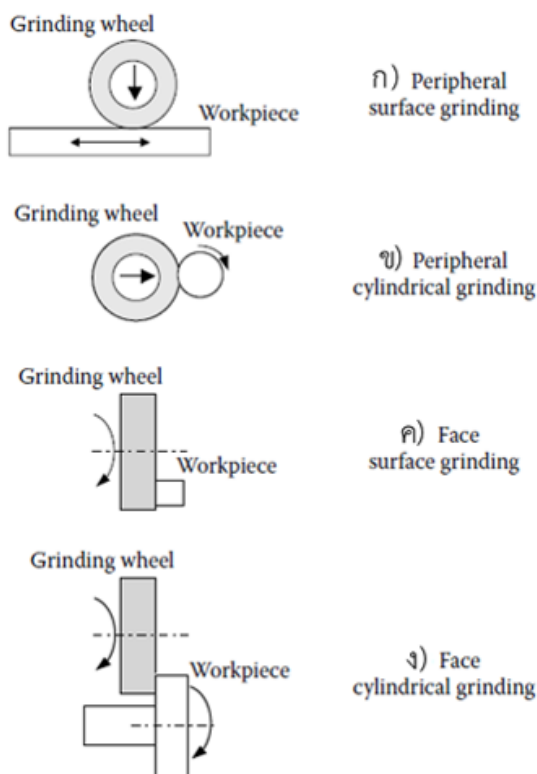
การเจียรระไนพื้นผิวของชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยชิ้นงานหมุนและสามารถเคลื่อนที่ได้และลื้อเจียรระไนจะหมุนอยู่กับที่ ดังภาพที่ 2.2 ข) ขณะเจียรระไนผิวของชิ้นงานด้านที่ถูกเจียรระไนจะสัมผัสกับผิวของลื้อเจียรระไนตลอดตามความยาวของเส้นรอบวง

### 2.2.3 การเจียรระไนผิวหน้าแบบราบ (Face surface grinding)

การเจียรระไนผิวชิ้นงานที่มีลักษณะแบนราบ ดังภาพที่ 2.2 ค) โดยที่ขณะเจียรระไนผิวของชิ้นงานด้านที่ถูกเจียรระไนทั้งหมดจะสัมผัสกับลื้อเจียรระไน

## 2.2.4 การเจียรระโนผิวหน้าแบบทรงกระบอก (Face cylindrical grinding)

การเจียรระโนปาดผิวชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอก โดยชิ้นงานสามารถหมุนได้ เช่นเดียวกับล้อเจียรระโน ดังภาพที่ 2.2 ง)

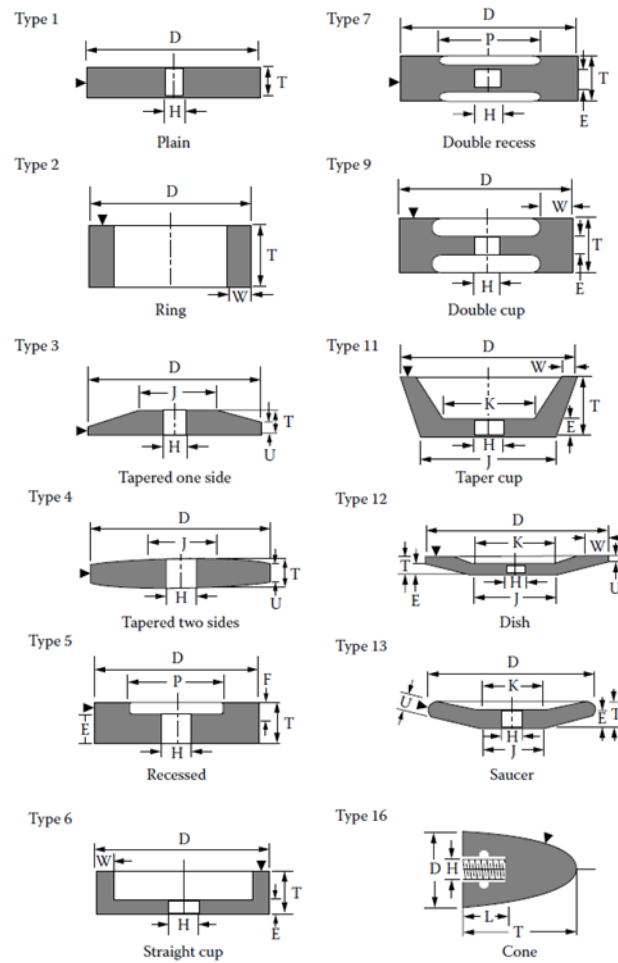


ภาพที่ 2.2 ประเภทของการเจียรระโนแบบต่างๆ (ก) Peripheral surface grinding, (ข) Peripheral cylindrical grinding, (ค) Face surface grinding และ (ง) Face cylindrical grinding [4]

## 2.3 ล้อเจียรระโน (Grinding wheel)

รูปร่างของล้อเจียรระโนมีหลายรูปร่าง และหลายขนาด การเลือกใช้ล้อเจียรระโนขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ตัวอย่างรูปร่างมาตรฐานสากลของล้อเจียรระโนแสดงดังภาพที่ 2.3 รูปร่างของล้อเจียรระโนส่วนใหญ่จะแสดงในรูปแบบสัญลักษณ์ได้แก่  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลาง,  $T$  = ความหนา,  $H$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของรู และ  $W$  = ความกว้างของผิวเจียรระโน





ภาพที่ 2.3 รูปร่างมาตรฐานสากลของล้อเจียรระไนแบบต่างๆ [4]

นอกจากการเลือกรูปร่างของล้อเจียรระไนให้มีความเหมาะสมวัตถุประสงค์การใช้งานแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงก่อนการเลือกใช้ล้อเจียรระไน เนื่องจากเป็นสิ่งที่บ่งบอกคุณสมบัติของล้อเจียรระไนและความเหมาะสมกับประเภทของงานนั้น ได้แก่

### 2.3.1 อนุภาคขัดสี (Abrasive grain)

อนุภาคขัดสีจะสัมผัสกับวัสดุที่ถูกเจียรระไนโดยตรงขณะเจียรระไน มีหน้าที่กำจัดหรือขัดวัสดุที่ถูกเจียรระไน สำหรับการเจียรระไนทุกประเภทอนุภาคขัดสี ต้องมีความแข็งมากกว่าวัสดุที่ถูกเจียรระไนทั้งภายใต้อุณหภูมิปกติและภายใต้อุณหภูมิสูง เนื่องจากขณะเจียรระไนบริเวณจุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานและอนุภาคเจียรระไนจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น หากวัสดุที่ถูกเจียรระไนมีความแข็งที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอนุภาคขัดสี อนุภาคขัดสีก็จะเกิดความเสียหายแทน โดยความแข็งของอนุภาคขัดสีส่วนใหญ่ที่ใช้ทำล้อเจียรระไนจะแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความแข็งของอนุภาคขัดสีประเภทต่างๆ [4]

| ประเภทของอนุภาคขัดสี                             | ความแข็ง (GPa) |
|--|----------------|
| เพชร (Diamond)                                   | 56-102         |
| คิวบิก โบรอน ไนไตรด์ (Cubic boron nitride)       | 42-46          |
| ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide)                | ~ 24           |
| อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide)              | ~ 21           |
| เหล็กกล้าเครื่องมือ (tool steel double tempered) | ~0.81          |

นอกจากคุณสมบัติในด้านความแข็งแล้วคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของอนุภาคขัดสียังเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ช่วยลดการสึกหรอของอนุภาคขัดสี และลดอุณหภูมิขณะเจียรระไน (Grinding temperature) ดังตารางที่ 2.2 แสดงค่าคุณสมบัติด้านความร้อนของอนุภาคขัดสี

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติด้านความร้อนของอนุภาคขัดสี [3]

| ประเภทอนุภาคขัดสี  | การนำความร้อน (W/m-K) | ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> ) | ความร้อนจำเพาะ (J/kg-K) | ความสามารถในการแพร่ (mm <sup>2</sup> /s) |
|--------------------|-----------------------|----------------------------------|-------------------------|--|
| เพชร               | 600-2,000             | 3,520                            | 511                     | 333-1,110                                |
| คิวบิกโบรอนไนไตรด์ | 240-1,300             | 3,480                            | 506                     | 136-738                                  |
| ซิลิคอนคาร์ไบด์    | 100                   | 3,210                            | 710                     | 44                                       |
| อะลูมิเนียมออกไซด์ | 35                    | 3,980                            | 765                     | 11.5                                     |

จากตารางที่ 2.2 คอลัมน์ที่ 2 แสดงค่าการนำความร้อนซึ่งค่าที่มากที่สุดแสดงถึงสมบัติของวัสดุประเภทนั้น ยังมีสารเจือปนก็จะทำให้ค่าการนำความร้อนลดลง อย่างไรก็ตามเพชร และคิวบิกโบรอนไนไตรด์ก็ยังมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าอนุภาคขัดสีประเภทอื่น ดังนั้น เพชร และคิวบิกโบรอนไนไตรด์จึงจัดเป็นอนุภาคขัดสีแบบพิเศษ (Superabrasive) ในที่นี้จะยกตัวอย่างอนุภาคขัดสีแบบพิเศษอย่างละเอียดซึ่งได้แก่

### 2.3.1.1 เพชร (Diamond)

เพชรเป็นวัสดุที่มีความแข็งที่สุดที่รู้จักกันแพร่หลาย ในงานด้านการเจียรระไนมีการนำเพชรมาใช้เจียรระไนเซรามิกที่มีความแข็งสูง หนึ่งในข้อดีของเพชรที่นำมาใช้ในงานเจียรระไนคือความสามารถในการคงความแข็งที่อุณหภูมิสูง ซึ่งยังคงมีความเสถียรแม้อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสในอากาศ และ 1,400 องศาเซลเซียสในสุญญากาศ อย่างไรก็ตามโครงสร้างของเพชรเกิดการเรียงตัว

ของอะตอมคาร์บอนซึ่งไม่เหมาะสมหากนำมาใช้เจียรระไนเหล็กกล้า เนื่องจากความสามารถในการละลายของอะตอมคาร์บอนในเหล็กกล้าจะทำให้เพชรสึกหรือไวขึ้น

เพชรมีคุณสมบัติด้านความร้อนที่ดี นั่นก็คือความนำความร้อนซึ่งช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นขณะเจียรระไน ซึ่งจากตารางที่ 2.2 มีค่าที่สูงอยู่ในช่วง 600-2,000 W/m-K ข้อควรระวังหากนำเพชรมาใช้ในงานเจียรระไนคือ ความแข็งของเพชรขึ้นอยู่กับทิศทางที่ทำการวัด ซึ่งจะเป็นเรื่องยากหากต้องการรู้ความแข็งของเพชรที่แท้จริง เพชรยังมีระนาบที่แตกหักง่าย (Cleavage plane) ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงแรงกระแทกทางกล นอกจากนี้เพชรยังมีความสามารถในการทนการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal shock) ที่น้อย ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้งานประเภทนี้

### 2.3.1.2 ขนาดอนุภาคของเพชร (Size of diamond)

เนื่องจากการแสดงขนาดอนุภาคเพชรมีหลากหลายหน่วย ตารางที่ 2.3 แสดงขนาดของอนุภาคเพชรในหน่วยต่างๆ เพื่อให้มีความเข้าใจที่ตรงกัน

ตารางที่ 2.3 ขนาดของอนุภาคเพชรในแต่ละหน่วย

| USA Grit Size (mesh)                                  | Size-Microns (range or average mean)          | Size-Inches (range-or average) | Number Particle in One Carat (approx.)   |
|---|---|--------------------------------|--|
| Mesh is the number of wires per inch in a screen mesh | 1 micron = $3.93700787 \times 10^{-5}$ inches | 1 inches = 25,400 microns      | 1 carat = 0.3 grams<br>1 gram = 5 carats |
| 8/10  | 2380-2000                                     | .093-.075                      | 4.2-7                                    |
| 10/12   | 2000-1680                                     | .075-.066                      | 7-12                                     |
| 12/14   | 1680-1410                                     | .066-.055                      | 12-20                                    |
| 14/16   | 1410-1190                                     | .055-.047                      | 20-33                                    |
| 16/18   | 1190-1000                                     | .047-.039                      | 33-57                                    |
| 18/20   | 1000-840                                      | .039-.033                      | 57-97                                    |
| 20/25   | 840-710                                       | .033-.028                      | 97-160                                   |

ตารางที่ 2.3 ขนาดของอนุภาคเพชรในแต่ละหน่วย (ต่อ)

| USA Grit Size (mesh)                                  | Size-Microns (range or average mean)          | Size-Inches (range-or average) | Number Particle in One Carat (approx.)   |
|---|---|--------------------------------|--|
| Mesh is the number of wires per inch in a screen mesh | 1 micron = $3.93700787 \times 10^{-5}$ inches | 1 inches = 25,400 microns      | 1 carat = 0.3 grams<br>1 gram = 5 carats |
| 25/30   | 710-590                                       | .028-.023                      | 160-282                                  |
| 30/35   | 590-500                                       | .023-.019                      | 282-460                                  |
| 35/40   | 500-420                                       | .019-.016                      | 460-770                                  |
| 40/45   | 420-350                                       | .016-.014                      | 770-1,334                                |
| 45/50   | 350-297                                       | .014-.012                      | 1,334-2,080                              |
| 50/60   | 297-250                                       | .012-.010                      | 2,080-3,240                              |
| 600/700   | 30-29   | .0012-.0011                    | ~2,046,000-2,418,850                     |
| 700/800   | 29-25   | .0011-.0010                    | 2,418,850-9,503,000                      |
| 900   | 18.5  | .00073                         | $\sim 1.18 \times 10^6$                  |
| 1000  | 16.5  | .00065                         | $\sim 1.32 \times 10^7$                  |
| 1100  | 14.5  | .00057                         | $\sim 1.32 \times 10^7$                  |
| 1200  | 18-12   | .00071-.00047                  | $\sim 1.696 \times 10^7$                 |
| 1400  | 10.5  | .00041                         | $\sim 1.696 \times 10^7$                 |
| 1500  | 9.5   | .00037                         | $\sim 1.39 \times 10^8$                  |
| 2200  | 10-6  | .00047-.00031                  | $\sim 7.86 \times 10^8$                  |
| 3000  | 8-4   | .00031-.00016                  | $\sim 2.62 \times 10^8$                  |

### 2.3.2 ตัวประสาน (Bond)

หน้าที่ของตัวประสานสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. ตัวประสานที่ยึดอนุภาคขัดสีแบบชั้นเดียว (single layer) ให้ติดบนแกนหลักที่เป็นเหล็กกล้า
2. ตัวประสานประที่ที่สามารถเกิดการสึกหรอไปพร้อมกับอนุภาคขัดสีและเผยผิวใหม่ของอนุภาคขัดสีในชั้นถัดไป

และสามารถแบ่งลักษณะของตัวประสานได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่

#### 2.3.2.1 ตัวประสานอินทรีย์ (Organic bonds)

ตัวประสานอินทรีย์จะมีความยืดหยุ่นกว่าตัวประสานแบบอื่น ด้วยความโดดเด่นในด้านความยืดหยุ่น ตัวประสานประเภทนี้จึงมีประโยชน์ในด้านความปลอดภัย หากใช้เจียรไนด้วยความเร็วรอบสูง หรือการใช้งานที่มีการรับแรงเยอะๆ หรืองานที่ต้องการผิวที่เรียบ โดยส่วนใหญ่ตัวประสานอินทรีย์จะใช้คู่กับอนุภาคขัดสีแบบธรรมดา แต่ก็สามารถใช้กับอนุภาคขัดสีแบบพิเศษได้ในกรณีที่ต้องการความเรียบผิวของงานต่ำ

ตัวประสานอินทรีย์ทุกประเภทจะเกิดการสึกหรออย่างรุนแรงที่อุณหภูมิสูง ตัวประสานโพลีเอไมด์ (Polyamide bonds) จะทนการสึกหรอที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าตัวประสานฟีนอลิก (Phenolic bonds) ตัวประสานยาง (Rubber bonds) ก็เช่นเดียวกัน แต่ข้อดีของตัวประสานยางจะใช้กับงานตกแต่งผิวได้ดีเนื่องจากความนุ่มของตัวประสานยางจะหลีกเลี่ยงรอยขีดข่วนที่จะเกิดขึ้น

#### 2.3.2.2 ตัวประสานแก้ว (Vitrified bonds)

ล้อเจียรไนที่มีแก้วเป็นตัวประสานจะมีองค์ประกอบ 3 ส่วนหลัก ได้แก่ อนุภาคขัดสี, ตัวประสาน และรูพรุน ตัวประสานแก้วจะแข็งกว่าตัวประสานอินทรีย์ แต่จะนิ่มกว่าตัวประสานโลหะ ประโยชน์ของตัวประสานแก้วคือ สามารถแต่งผิว (trued) ให้เป็นรูปได้โดยง่าย ทำให้สามารถใช้ได้กับงานหลายประเภท การแต่งผิวยังช่วยทำให้ล้อเจียรไนกลับมามีรูปร่างคงเดิม เมื่อใช้งานไปนานๆ หรือล้อเจียรไนเสียรูปไป

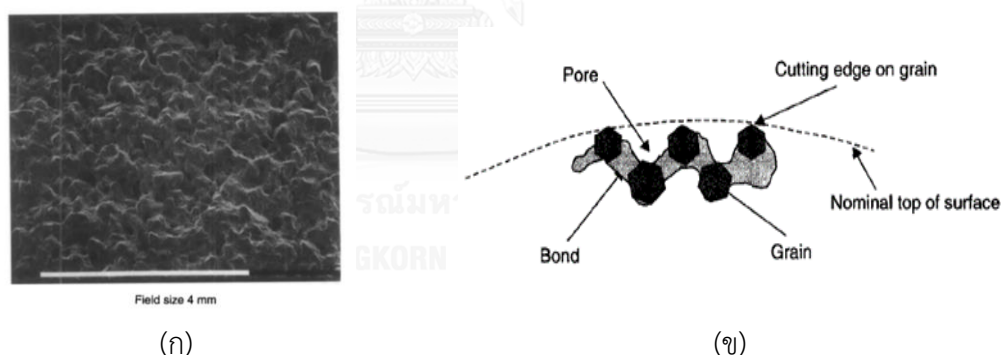
การเตรียมตัวประสานแก้วทำได้โดยการผสมแก้ว (Glass frits), ดินเหนียว (Clays) และฟลักซ์ (Fluxes) เช่น บอแรคซ์ (Borax) และ ฟิลสปาร์ (Feldspar) จากนั้นผสมน้ำและตัวประสาน เช่น สารจำพวก เดกตริน (Dextrin) เมื่อผสมน้ำเข้ากับตัวประสานแล้วนำเนื้อผสมที่ได้ไปผสมกับอนุภาคขัดสี เติมสารที่ทำให้เกิดรูพรุน และทำการกดลงบนแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะถูกให้ความร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวประสานลง

### 2.3.2.3 ตัวประสานโลหะ (Metal bonds)

ตัวประสานโลหะจะใช้กับอนุภาคขัดสีแบบพิเศษโดยส่วนใหญ่ เช่น เพชร หรือคิวบิกโบรอนไนไตรด์ ตัวประสานโลหะจะใช้กับงานเจียรไนเซรามิกที่มีความแข็งสูง เนื่องจากตัวประสานชนิดนี้มีความแข็งสูงสุดเมื่อเทียบกับตัวประสานประเภทอื่น โดยส่วนมากตัวประสานโลหะจะผลิตเป็นล้อยเจียรไนแบบอนุภาคขัดสีชั้นเดียว ทำให้ล้อยเจียรไนประเภทนี้มีราคาแพงเนื่องจากต้องใช้เวลาในการควบคุมให้อนุภาคขัดสีเรียงตัวแบบชั้นเดียวบนล้อยเจียรไนอย่างแม่นยำ ตัวอย่างการผลิตล้อยเจียรไนตัวประสานโลหะ ได้แก่ อิเล็กโทเพลต (Electroplating)

### 2.3.3 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไน (Morphology)

สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไน จะมีลักษณะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคเจียรไน และชนิดของตัวประสานซึ่งโดยทั่วไปตัวประสานจะทำหน้าที่ประสานอนุภาคเจียรไนให้อยู่กระจายกันอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน และอนุภาคเจียรไนจะโผล่เหนือตัวประสานขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเจียรไนเพราะมีความแข็งที่แข็งกว่าตัวประสาน โดยในที่นี้จะขอกกล่าวถึงแค่สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนที่มีแก้วเป็นตัวประสานดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) คิวบิกโบรอนไนไตรด์ที่มีแก้วเป็นตัวประสาน, (ข) ภาพจำลอง [3]

ลักษณะทั่วไปของล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีแก้วเป็นตัวประสานนั้น สามารถจำลองได้ดังภาพที่ 2.4 ข) อนุภาคขัดสีจะยื่นขอบตัดออกมาเพื่อเจียรไนชิ้นงาน ส่วนตัวประสานจะทำหน้าที่ยึดอนุภาคขัดสีให้อยู่กับที่ และรูพรุนจะทำหน้าที่เก็บเศษวัสดุที่เกิดจากการเจียรไน

## 2.4 พารามิเตอร์การเจียรระไนและการลับคม (Grinding and Dressing parameters)

พารามิเตอร์การเจียรระไนและการลับคมคือ ค่าที่แสดงการทำงานของเครื่องเจียรระไนขณะเจียรระไนหรือการลับคม ในที่นี้จะขอกกล่าวเพียงแค่ว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้ ระยะป้อนลึก ( $a_d$ ) หมายถึง ระยะของวัสดุที่จะถูกเจียรระไน ซึ่งเหมือนกับ ระยะป้อนลึกการลับคมเพียงแต่  $a_d$  แสดงระยะของหินลับคมที่จะถูกเจียรระไน, ความเร็วล้อเจียรระไน ( $v_s$ ) หมายถึง ความเร็วของล้อเจียรระไนขณะเจียรระไน, ความเร็วของชิ้นงาน ( $v_w$ ) หมายถึง ความเร็วของชิ้นงานที่เคลื่อนที่ โดยส่วนใหญ่จะใช้กับชิ้นงานที่หมุนขณะเจียรระไน, โดยตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างพารามิเตอร์การเจียรระไนและการลับคมในหน่วยที่นิยมใช้

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์การเจียรระไน [2]

| สัญลักษณ์ | ค่าพารามิเตอร์  | หน่วย |
|-----------|-----------------|-------|
| $a_d$     | Dressing depth  | mm    |
| $a_e$     | Depth of cut    | mm    |
| $v_f$     | Feed rate       | mm/s  |
| $v_s$     | Wheel speed     | rpm   |
| $v_w$     | Workpiece speed | m/min |
| $v'$      | Fluid flow rate | l/min |

## 2.5 วัสดุผสมอะลูมินา – ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ( $Al_2O_3$ -TiC)

อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ( $Al_2O_3$ -TiC) ซึ่งผลิตขึ้นจากกระบวนการอัดด้วยความร้อน (Hot pressing) เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูง มีรูพรุนน้อยกว่า 0.1% สมบัติทางกลของวัสดุผสมขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาค คือความหนาแน่น และขนาดเกรนที่เกิดจากกระบวนการผลิต

**คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เป็นดังนี้ [2]**

- ความแข็ง (Hardness) 2,400 GPa
- โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) 390 GPa
- สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion)  $78.5 (10^{-7}/K)$
- ขนาดเกรน (Average Grain Size)  $0.5 \mu m$
- ความหนาแน่น (Density)  $4.25 (10^3 kg/m^3)$

## 2.6 สารหล่อเย็น (Grinding fluid)

จุดประสงค์หลักของการใช้น้ำหล่อเย็นคือ ลดแรงทางกล, อุณหภูมิ และผลกระทบทางเคมีระหว่างล้อเจียรระโนชิ้นงาน น้ำหล่อเย็นยังใช้สำหรับเป็นสารหล่อเย็น และสารหล่อลื่นในกระบวนการเจียรระโนโดยทั่วไปแล้วสิ่งที่ต้องการจากน้ำหล่อเย็น คือ มีคุณสมบัติเป็นสารหล่อลื่นที่ดี, สารหล่อเย็นที่ดี, สามารถชะล้างได้ดี ไม่กัดกร่อนต่อชิ้นงาน และล้อเจียรระโน

Rustlick เป็นน้ำหล่อเย็นที่เหมาะสมสำหรับล้อเจียรระโนแบบเพชรซึ่งมีความโดดเด่นในเรื่องเป็นสารให้ความเย็นที่ดี เป็นตัวก่อสร้างฟิล์มบนผิวชิ้นงานและผิวล้อเจียรระโนเพื่อกันการกัดกร่อนที่ดี

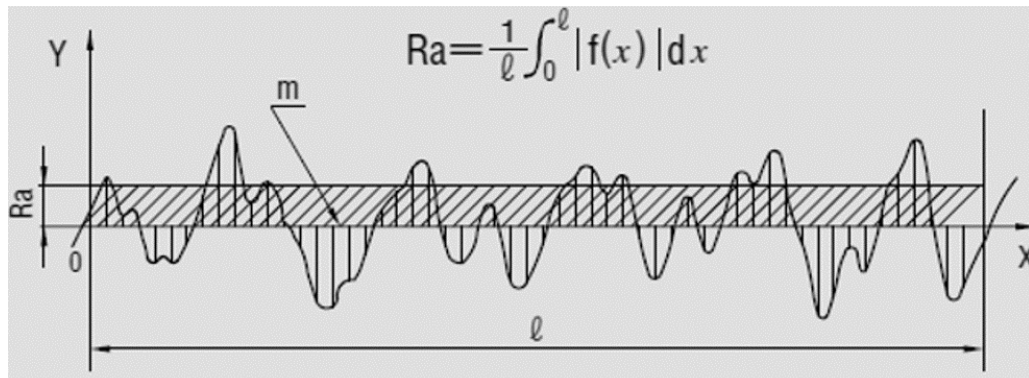
### คุณสมบัติทางกายภาพเป็นดังนี้

|                                     |                |
|-------------------------------------|----------------|
| - สี (color)                        | เหลือง/ส้ม     |
| - พีเอชที่ร้อยละ 10 (pH at 10%)     | 9.3            |
| - ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) | 1.06           |
| - จุดวาบไฟ (Flash point)            | >200 F (93 °c) |
| - จุดเดือด (Boiling point)          | 212 F (100 °c) |
| - คลอไรด์ (Chlorine)                | none           |

## 2.7 ความหยาบผิว (Surface Roughness)

ความเรียบผิว หรือความหยาบผิว เป็นตัวบ่งบอกถึงความขรุขระของพื้นผิว หากความหยาบผิวมากหมายถึงความขรุขระของผิวมาก ในทำนองเดียวกันหากความหยาบผิวน้อยหมายถึงความขรุขระของผิวน้อย การวัดความหยาบผิวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท การวัดความหยาบผิวโดยเฉลี่ย และการวัดความหยาบผิวโดยขนาด ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการวัดความหยาบผิวโดยเฉลี่ย ซึ่งหมายถึง การวัดและการคำนวณเพื่อให้รู้ความหยาบโดยรวม แต่ไม่สามารถรู้ลักษณะความสูง-ต่ำของพื้นผิวได้ ค่าที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับการวัดความหยาบผิวโดยเฉลี่ยคือ ความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต ( $R_a$ ) วิธีการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตแสดงดังภาพที่ 2.5

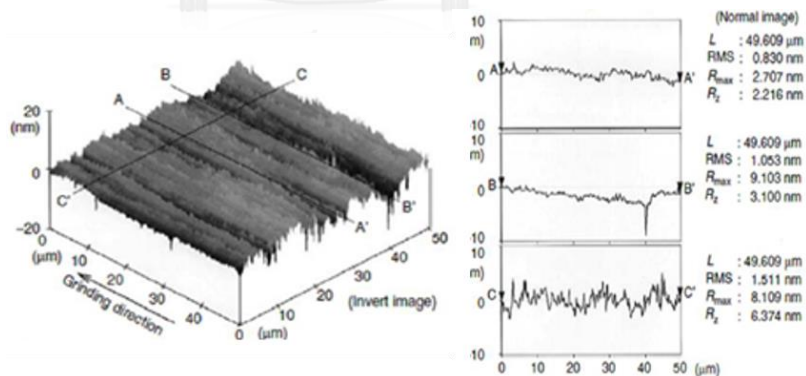




ภาพที่ 2.5 วิธีการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต [2]

### 2.7.1 ความหยาบผิวของชิ้นงาน (Workpiece surface roughness)

ลักษณะความหยาบผิวของชิ้นงานเป็นค่าสำคัญที่เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของกระบวนการเจียรไนลักษณะพื้นผิวที่ต้องการคือ ความหยาบผิวของชิ้นงานต้องถูกจำกัดไว้ในระดับที่ต้องการ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต ( $R_a$ ) เป็นตัวแปรที่มีประโยชน์ และใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับบ่งบอกความหยาบผิวหลังกระบวนการเจียรไนความหยาบผิวของชิ้นงานสามารถตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมซึ่งประกอบด้วยคาน ที่บริเวณปลายคานมีหัวโพรบ (Probe) แหลมยื่นลงมาสัมผัสกับพื้นผิว เมื่อลากสแกนผ่านพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบแรงที่หัวโพรบผลักกับแรงอะตอมในชิ้นงานทำให้เกิดการงอของคาน การงอจะถูกตรวจวัดอีกทีด้วยเพียโซ (Piezore) ข้อมูลจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและสร้างเป็นภาพ ดังตัวอย่างภาพที่ 2.6



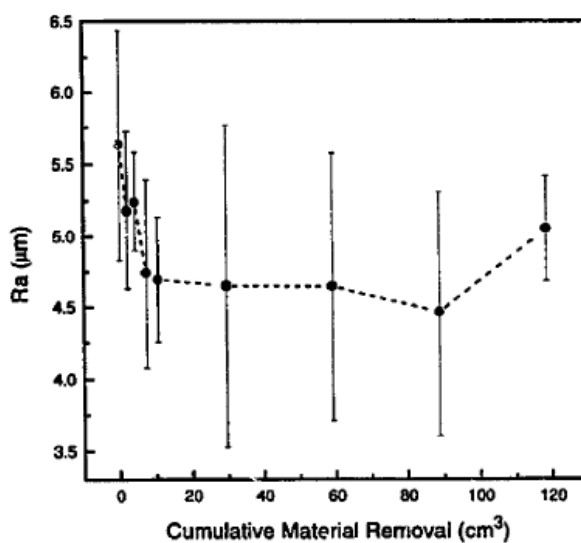
ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดความหยาบผิว [1]

### 2.7.2 ความหยาบผิวของล้อเจียรไน (Grinding wheel surface roughness)

ความหยาบผิวของล้อเจียรไนเป็นพารามิเตอร์ทางอ้อมที่บอกถึงลักษณะของล้อเจียรไน โดยนัยของความหยาบผิวของล้อเจียรไนคือ ถ้าหากมีความหยาบผิวสูงนั้นจะแสดงถึงล้อเจียรไนมีความคม อนุภาคขัดสีไหลเหินือตัวประสานมาก พร้อมทั้งจะใช้งาน ในทางกลับกันหากค่าความหยาบ

ผิวของล้อเจียรไนต่ำหมายถึงล้อเจียรไนมีความคมน้อย อนุภาคขัดสีโผล่เหนือตัวประสานน้อย ไม่เหมาะแก่การใช้งาน

T.W. Liao *et al.* [5, 6] ได้ทำการศึกษาความหยาบผิวของล้อเจียรไนที่สภาวะต่างๆ ได้ผลดังภาพที่ 2.7 โดยให้ข้อสรุปว่าความหยาบผิวของล้อเจียรไนจะลดลงอย่างรวดเร็วในการใช้งานแรกๆ และจะคงที่หลังจากใช้กำจัดเนื้อวัสดุออกไป 21 ลูกบาศก์เซนติเมตร เนื่องจากล้อเจียรไนมีความสามารถลับคมในตัวเองนั่นเองจึงทำให้ความหยาบผิวของล้อเจียรไนคงที่



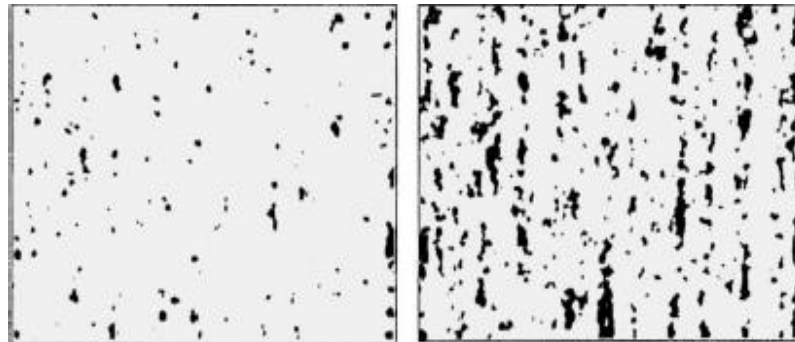
ภาพที่ 2.7 ความหยาบผิวของล้อเจียรไนต่ออัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ [5, 6]

## 2.8 การลับคม (Dressing)

การลับคมคือกระบวนการที่กระทำต่อล้อเจียรไนเพื่อให้ล้อเจียรไนพร้อมสำหรับการเจียรไน โดยจุดประสงค์ของการลับคมได้แก่

- เพื่อให้ล้อเจียรไนมีรูปร่างตามที่ต้องการ หรือให้ล้อเจียรไนมีความเที่ยงตรง
- ลับคมเพื่อแต่งพื้นผิวล้อเจียรไนและทำให้อนุภาคเจียรไนกระจายอย่างสม่ำเสมอ
- เพื่อกำจัดตัวประสานรอบๆ อนุภาควัสดุขัดสีเพื่อเปิดผิวหน้าของล้อเจียรไน
- เพื่อทำความสะอาดล้อเจียรไนจากการปนเปื้อนของชิ้นงาน

T. Matsuo *et al.* [7] ได้ศึกษาผลของการลับคมโดยใช้เทคนิคภาพ 2 สี (binary image) ดังภาพที่ 2.8 โดยสรุปว่าหลังการลับคมอนุภาคขัดสีจะโผล่เหนือตัวประสาน และมีปริมาณอนุภาคขัดสีมากขึ้น



ภาพที่ 2.8 binary image ก่อนลั้บคม (ซ้าย) และหลังลั้บคม (ขวา) [7]

## 2.9 การสึกหรอของล้อเจียรระไน (Wear of grinding wheel)

จากข้อมูลพื้นฐานของล้อเจียรระไนที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ล้อเจียรระไนประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ อนุภาคขัดสี และตัวประสาน ดังนั้นการสึกหรอของล้อเจียรระไนจึงสามารถแบ่งพิจารณาเป็น 2 ส่วนได้ดังนี้

### 2.9.1 การสึกหรอของอนุภาคขัดสี (Wear of abrasive grain)

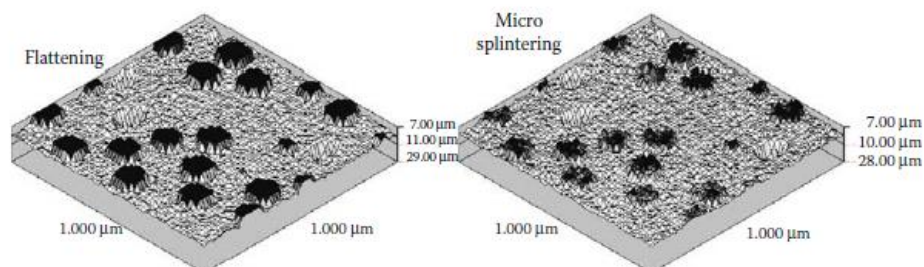
การสึกหรอของอนุภาคขัดสีสามารถแบ่งออกได้ 4 รูปแบบดังนี้

#### 2.9.1.1 การเสียมคม (Flattening)

การสึกหรอแบบนี้เป็นการสึกหรอปกติ เกิดจากอนุภาคขัดสีสัมผัสกับชิ้นงานขณะเจียรระไน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก อนุภาคขัดสีจึงแบนราบดังภาพที่ 2.9 (ซ้าย) การสึกหรอแบบเสียมคมจะเกิดขึ้นกับอนุภาคขัดสีเกือบทุกประเภทดังรายงาน [8, 9]

#### 2.9.1.2 การแตกหักของอนุภาคขัดสี (Microcrystalline grain splintering)

การแตกหักของอนุภาคขัดสีเป็นผลมาจากเกิดจากแรงทางกลและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะเจียรระไน ทำให้อนุภาคขัดสีเกิดความเสียหาย การแตกหักของอนุภาคขัดสีจะส่งผลให้เกิดการหลุดออกบางส่วนของอนุภาคขัดสี



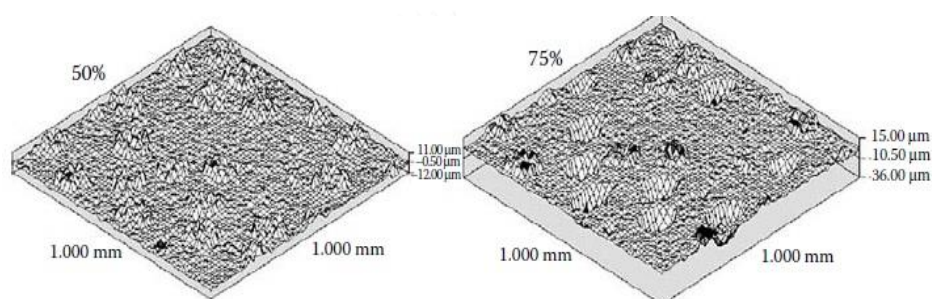
ภาพที่ 2.9 การสึกหรอของอนุภาคขัดสี Flattening (ซ้าย) และ Micro splintering (ขวา)

### 2.9.1.3 การหลุดออกบางส่วนของอนุภาคขี้ดลี (Partial grain break-off)

เป็นผลมาจากข้อ 2.9.1.2 คือเกิดแรงทางกลและอุณหภูมิที่มากเกินไปทำให้สูญเสียเนื้อของอนุภาคขี้ดลีไปบางส่วนดังภาพที่ 2.10 (ซ้าย)

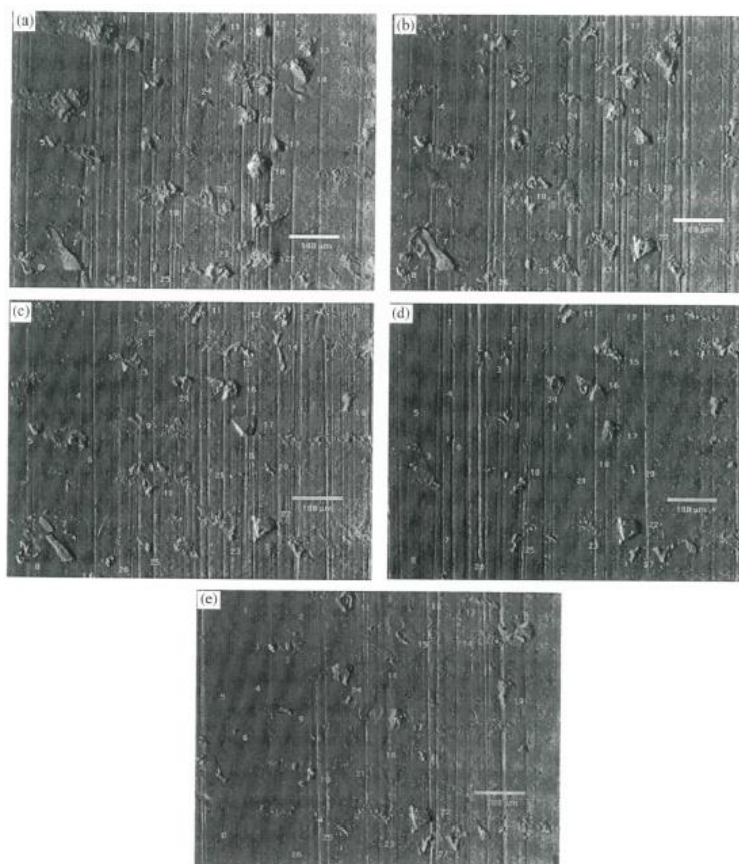
### 2.9.1.4 การหลุดออกของอนุภาคขี้ดลี (Grain break-out)

เกิดจากการโผล่ที่มากเกินไปของอนุภาคขี้ดลีเหนือตัวประสาน และความเค้นที่กระทำต่อตัวประสานที่มากเกินไปขณะเจียรไนทำให้อนุภาคขี้ดลีทั้งอนุภาคหลุดออกจากตัวประสานดังภาพที่ 2.10 (ขวา)



ภาพที่ 2.10 การสึกหรอของอนุภาคขี้ดลี Partial grain break-off (ซ้าย) และ Grain break-out (ขวา) [10]

T.W. Liao *et al.* [5, 6] ได้ทำการทดลองและศึกษาการสึกหรอของล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเรซินในกระบวนการเจียรไนวัสดุประเภทเซรามิก โดยที่ทำการตรวจสอบการสึกหรอของเม็ดเพชรบนล้อเจียรไน (อนุภาคเพชรขนาดประมาณ 88.9 ไมโครเมตร) ซึ่งการทดลองประสบผลสำเร็จในแง่ของการตรวจสอบล้อเจียรไนบริเวณเดิมทุกครั้งที่สามารถใช้งานต่างๆ (ปริมาณของชิ้นงานสะสม 2.1, 4.2, 7.4, 10.6, 29.6, 59.2, 88.8, 118.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร) โดยใช้แผ่นเทปตะกั่วกดลงบนล้อเจียรไนเพื่อทำการลอกลายลักษณะของล้อเจียรไนลงบนแผ่นเทปตะกั่ว และนำแผ่นเทปตะกั่วไปตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาดพบว่าการสึกหรอของอนุภาคเพชรมี 3 ประเภท ได้แก่ Flattening, Grain break-out และ Micro splintering ดังภาพที่ 2.11

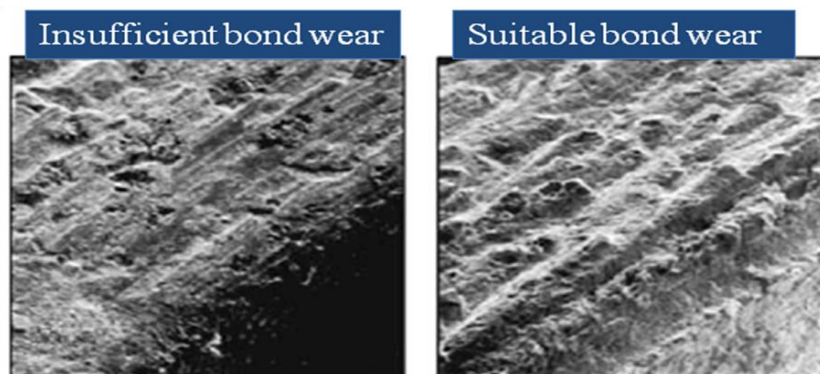


ภาพที่ 2.11 สัณฐานวิทยาของอนุภาคเพชรที่สภาวะต่างๆ (a) as-dressed, (b), (c), (d), (e) หลังจากเจียรไนชิ้นงานไป 2.1, 4.2, 7.4, 10.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ [5]

งานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยของผู้เขียนในแง่ประเภทของล้อเจียรไน, ขนาดของอนุภาคเพชร และพารามิเตอร์การเจียรไน ซึ่งการศึกษาการสึกหรอของอนุภาคเพชรที่มีขนาดใหญ่จะทำได้ง่ายกว่าอนุภาคเพชรที่มีขนาดเล็ก

### 2.9.2 การสึกหรอของตัวประสาน (Bond wear)

โดยทั่วไปคุณสมบัติของล้อเจียรไนที่ต้องการคือ การสึกหรอของอนุภาคขัดสี และตัวประสานต้องสัมพันธ์กัน กล่าวคือ การสึกหรอของอนุภาคขัดสี และตัวประสานต้องสึกหรอในปริมาณพอเหมาะไม่มากหรือน้อยเกินไป ถ้าหากอนุภาคขัดสีสึกหรอสึกมากกว่าตัวประสาน (insufficient bond wear) จะทำให้อนุภาคขัดสีหลุดออกจากตัวประสาน เนื่องจากตัวประสานมีความแข็งแรงมากเกินไป แต่ถ้าหากทั้งอนุภาคขัดสี และตัวประสานมีการสึกหรอที่เหมาะสมก็จะเกิดการสึกหรอที่เรียกว่า suitable bond wear ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 การสึกหรอของตัวประสาน insufficient bond wear (ซ้าย) และ Suitable bond wear (ขวา) [10]

## 2.10 การประเมินการสึกหรอของล้อเจียรไน (Wheel wear assessment)

การประเมินการสึกหรอของล้อเจียรไนคือ วิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบการสึกหรอของล้อเจียรไน เนื่องจากความหลากหลายของล้อเจียรไน ทั้งรูปร่าง, ลักษณะของอนุภาคขัดสี, ขนาดของอนุภาคขัดสี หรือตัวประสาน ดังนั้นวิธีการประเมินการสึกหรอของล้อเจียรไนจึงมีหลายวิธี เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับล้อเจียรไนนั้นๆ สำหรับวิธีการประเมินและข้อดีข้อเสียของวิธีนั้นๆ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การประเมินการสึกหรอแบบต่างๆ [11]

| รูปแบบการประเมิน | วิธีการ   | ข้อดี  | ข้อเสีย   |
|------------------|---|--|---|
| โดยตรง (direct)  | การทำแผนที่ (Topography - method)<br>- SEM<br>- กล้องจุลทรรศน์ 3 มิติ | - สามารถเห็นการสึกหรอของล้อเจียรไนได้โดยตรง<br>- เข้าใจพฤติกรรมการสึกหรอได้ถูกต้องกว่าวิธีอื่น | - ชิ้นงานต้องนำไฟฟ้าหากต้องการตรวจสอบด้วย SEM<br>- ชิ้นงานต้องมีขนาดที่สามารถใช้กับ SEM ได้ |

ตารางที่ 2.5 การประเมินการสึกหรอแบบต่างๆ (ต่อ)

| รูปแบบการประเมิน                | วิธีการ   | ข้อดี  | ข้อเสีย   |
|---------------------------------|---|--|---|
| โดยอ้อม<br>(indirect)           | การลอกกลาย<br>(Imprint method)<br>- Lead tape<br>- Aluminium tape | - สามารถทำได้ง่าย<br>สะดวก   | - อาจไม่เห็นการสึกหรอที่แท้จริง/<br>ลอกกลายได้ไม่เท่ากับชิ้นงานจริง<br>- ใช้ได้เฉพาะกับล้อเจียรไนที่มี<br>อนุภาคขัดสีขนาดใหญ่ |
|                                 | โปรไฟล์<br>(profile method)<br>- Profilometer                     | - สามารถทำได้ง่าย<br>- รวดเร็ว<br>- ค่าใช้จ่ายต่ำ                                | - ไม่เห็นการสึกหรอของล้อ<br>เจียรไนเนื่องจากข้อมูลที่ได้เป็น<br>ค่าความหยาบผิวและลักษณะโปร<br>ไฟล์                            |
| เรียลไทม์<br>(real time method) | ติดเซนเซอร์<br>(sensor)<br>-เซนเซอร์วัดแรง<br>-เซนเซอร์วัด        | - สามารถทำได้ง่าย<br>- ค่าใช้จ่ายต่ำ<br>- ดูความผิดปกติที่<br>เกิดขึ้นขณะเจียรไน | - ไม่เห็นการสึกหรอที่แท้จริงของ<br>ล้อเจียรไน   |

GATZEN *et al.* [12] ได้ทำการประเมินการสึกหรอของอนุภาคเพชรโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยนำใบมีดที่มีชั้นของเพชรแบบชั้นเดียว (Single layer) ไปทำการตัดวัสดุได้แก่ เหล็กกล้า, ซิลิคอน, อะลูมินา และอัลทิก เนื่องจากเป็นเพชรแบบชั้นเดียว และมีขนาดใหญ่ (32 ไมโครเมตร) จึงสามารถทำให้เห็นการสึกหรอของเพชรที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดได้ชัดเจน นอกจากนี้ Zhiqiang *et al.* [8] ศึกษาการสึกหรอของของล้อเจียรไนที่มีเรซินเป็นตัวประสานโดยใช้กล้องเลเซอร์แบบสามมิติ ทำให้เห็นผิวของล้อเจียรไนอย่างชัดเจนและสามารถจำลองการสึกหรอที่เกิดขึ้นได้

### บทที่ 3

#### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

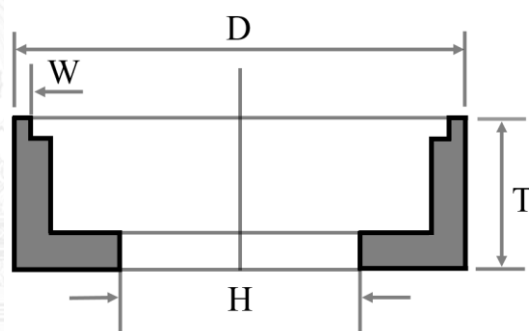
#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำการทดลอง

##### 3.1.1 ล้อเจียร์ไน

ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วโดยมีลักษณะดังตารางที่ 3.1 และภาพที่ 3.1 แสดงภาพวาดภาพตัดขวางลักษณะของล้อเจียร์ไน โดยการทดลองจะใช้ล้อเจียร์ไนทั้งหมด 5 ชิ้น

ตารางที่ 3.1 ลักษณะของล้อเจียร์ไน

|   |                   |
|---|-------------------|
| ประเภทอนุภาคขัดสี                       | เพชร              |
| ชนิดของตัวประสาน                        | เนื้อแก้ว         |
| ขนาดของอนุภาคขัดสี                      | 9.5 $\mu\text{m}$ |
| ความกว้างของผิวเจียร์ไน (W)             | 2 mm              |
| ความสูง (T)                             | 35 mm             |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู (H)          | 47.7 mm           |
| ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของล้อเจียร์ไน (D) | 69 mm             |



ภาพที่ 3.1 ภาพตัดขวางลักษณะของล้อเจียร์ไน

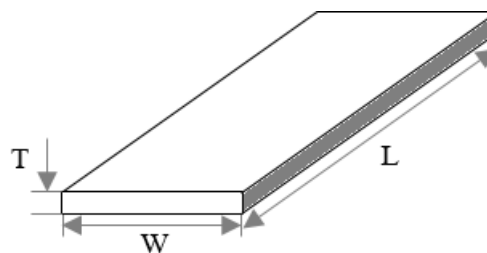
##### 3.1.2 อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ใช้ในการทดลองมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2 และมีรูปร่างดังภาพที่ 3.2 โดยบริเวณที่แรงเสียดทานนั้นจะเป็นด้านที่ถูกเจียร์ไน และในการทดลองจะใช้อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งหมด 180 ชิ้น



ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติและลักษณะของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

|                |   |
|----------------|---|
| ส่วนผสมทางเคมี | 70-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /30-TiC |
| ความกว้าง (W)  | 12 mm                                     |
| ความยาว (L)    | 45 mm                                     |
| ความหนา (T)    | 0.85 mm                                   |
| ความแข็ง       | 2,400 (HV)                                |
| ขนาดเกรน       | 0.5 (μm)                                  |



ภาพที่ 3.2 ภาพจำลองลักษณะของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

### 3.1.3 อุปกรณ์สำหรับเตรียมล้อยีระไนก่อนตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- แผ่นสติ๊กเกอร์ทองแดง
- เครื่องมือสำหรับทำตำหนิบนล้อยีระไน
- กรดกัดแก้วชนิดเจลดความเข้มข้น 9 เปอร์เซ็นต์ (9% Hydrofluoric acid)

### 3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

- หินลับคมอะลูมินา (Straight white aludum no combination)
- เครื่องเจียระไน (DISCO DAD3350)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- เครื่องวัดความหยาบผิว (Profilometer Talyscan150, England)
- กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ยาลัย
- โปรแกรมติดตั้งบนเครื่องเจียระไนเพื่อวัดกระแสของมอเตอร์

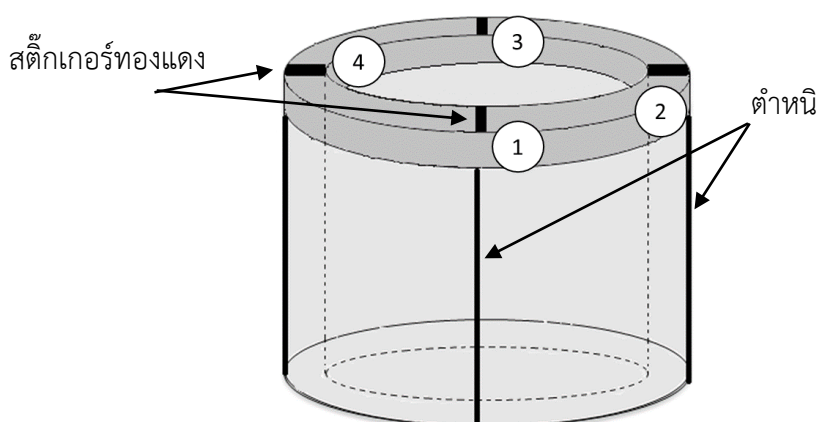
## 3.2 วิธีการทดลอง

### 3.2.1 การเตรียมล้อยีระไนเพื่อดูสัณฐานวิทยา

สำหรับการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยีระไนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยีระไนแบบปกติ (ล้อยีระไน 1 ชั้น) และส่วนที่สองจะเป็นการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยีระไนที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วความเข้มข้น 9 เปอร์เซ็นต์ (ล้อยีระไน 4 ชั้น) สาเหตุที่ต้องแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนนั้น เนื่องจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยีระไนแบบปกตินั้นไม่สามารถมองเห็นอนุภาคชัดสีได้อย่างชัดเจนเนื่องจากคุณสมบัติของแก้วที่เป็นตัวประสาน และเศษวัสดุที่ติดค้างบนล้อยีระไนที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ

### 3.2.1.1 การเตรียมล้อยีระไนเพื่อดูสัณฐานวิทยาแบบปกติ

การศึกษาการสีกรหของล้อยีระไน จำเป็นต้องศึกษาบริเวณตำแหน่งเดิมบนพื้นผิวของล้อยีระไนเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานวิทยาที่สภาวะต่างๆ (ล้อยีระไนที่ได้รับมา, หลังการล้บคม, หลังเจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15, 30 และ 45 ซึ้น) จึงจำเป็นต้องทำตำหนิบริเวณด้านข้างของล้อยีระไนเพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับติดสติกเกอร์ทองแดง โดยจะทำการวัดมุม 90 องศา และทำตำหนิรอบล้อยีระไนได้ 4 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 3.1 หมายเลข 1, 2, 3 และ 4 หมายถึง ตำแหน่งที่ หนึ่ง, สอง, สาม และสี่ ตามลำดับ



ภาพที่ 3.3 ลักษณะการเตรียมล้อยีระไนเพื่อดูสัณฐานวิทยา และโปรไฟล์

### 3.2.1.2 การเตรียมล้อยีระไนเพื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยีระไนที่ผ่านการกัดกรด

จะทำโดยการใช้กรดกัดแก้วความเข้มข้น 9 เปอร์เซ็นต์กัดบริเวณผิวของล้อยีระไนทั่วทั้งหน้าที่ใช้เจียรระไน โดยกัดทิ้งไว้ 1 นาที และล้างออก

### 3.2.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยีระไนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ว่าการตรวจสอบสัณฐานวิทยาจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนั้นการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยีระไนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดจึงสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

#### 3.2.2.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยีระไนแบบปกติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาพื้นผิวของล้อยีระไนแบบปกติด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะทำการตรวจสอบพื้นผิวของล้อยีระไนบริเวณเหนือสติกเกอร์ทองแดง

เฉพาะตำแหน่งที่หนึ่งและตรวจสอบตลอดความกว้างของล้อเจียรไน โดยใช้กำลังขยายต่างๆ ดังนี้ 500, 1,000 และ 2,000 เท่า

### 3.2.2.2 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนที่ผ่านการกัดกรดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สำหรับการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วนั้น จะทำการตรวจสอบแบบสุ่มบนล้อเจียรไน 3 ตำแหน่ง โดยใช้กำลังขยาย 1,000, 2,000 และ 5,000 เท่า

### 3.2.3 การวัดความหยาบผิวของล้อเจียรไนโดยเครื่องวัดความหยาบผิว profilometer

สำหรับการวัดความหยาบผิวของล้อเจียรไนจะใช้เครื่อง profilometer ลากโดยตรงบนพื้นผิวของล้อเจียรไนบริเวณที่ตรงกับตำแหน่งทั้ง 4 ข้างล้อเจียรไนพอดี จะทำการวัดทั้งหมด 3 ครั้งในแต่ละตำแหน่งเพื่อหาค่าเฉลี่ย สำหรับพารามิเตอร์ของการวัดจะแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์การวัดความหยาบผิวโดย profilometer

|                |                       |
|----------------|-----------------------|
| Brand          | Talyscan 150, England |
| Type of stylus | Contact profilometer  |
| Resolution     | 0.06 micron           |
| Scan speed     | 1500 micron/s         |
| Repeat time    | 3                     |
| Scan distance  | 0.7 mm                |

### 3.2.4 การเจียรไนและการลับคม

พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการเจียรไนและการลับคมจะเหมือนกันทุกประการดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ สำหรับการลับคมครั้งแรกและการลับคมปกติจะแตกต่างกัน ซึ่งการลับคมครั้งแรกจะเป็นการลับคม 20 ครั้ง ส่วนการลับคมปกติจะเป็นการลับคมแค่ 1 ครั้ง โดยใช้พารามิเตอร์อื่นๆ เหมือนกัน (Wheel speed, Feed rate เป็นต้น)

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์สำหรับการเจียรไน

|                                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| Wheel speed (rpm)              | 10,000          |
| Depth of cut ( $\mu\text{m}$ ) | 10              |
| Feed rate (mm/min)             | 7.62            |
| Coolant                        | Rustlick G1066L |

### ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์สำหรับการลับคม

|                                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| Wheel speed (rpm)              | 10,000          |
| Depth of cut ( $\mu\text{m}$ ) | 10              |
| Feed rate (mm/min)             | 3.4             |
| Coolant                        | Rustlick G1066L |

### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 ขั้นตอนการทดลองเพื่อคุณสมบัติของล้อเจียรไนแบบปกติ

3.3.1.1 นำล้อเจียรไนที่ได้รับมาเตรียมตามหัวข้อ 3.2.1.1

3.3.1.2 นำล้อเจียรไนไปตรวจสอบโปรไฟล์และวัดความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว profilometer

3.3.1.3 นำล้อเจียรไนไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.3.1.4 นำล้อเจียรไนไปลับคมครั้งแรกด้วยหินลับคมอะลูมินา (ใช้พารามิเตอร์การลับคมครั้งแรก

3.3.1.5 เตรียมล้อเจียรไนตามหัวข้อ 3.2.1.1

3.3.1.6 นำล้อเจียรไนไปตรวจสอบโปรไฟล์และวัดความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว profilometer

3.3.1.7 นำล้อเจียรไนไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.3.1.8 เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จำนวน 15 ชิ้น (วัดกระแสของมอเตอร์ขณะเจียรไน)

3.3.1.9 นำชิ้นงานอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชิ้น ที่ได้หลังเจียรไน มาวัดความหยาบผิวด้วยเครื่อง AFM

3.3.1.10 เตรียมล้อเจียรไนตามหัวข้อ 3.2.1.1

3.3.1.11 นำล้อเจียรไนไปตรวจสอบโปรไฟล์และวัดความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว profilometer

3.3.1.12 นำล้อเจียรไนไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

3.3.1.13 นำล้อยเจียรไนไปลับคมด้วยหินลับคมอะลูมินาโดยใช้พารามิเตอร์การลับคมปกติ

3.3.1.14 เตรียมล้อยเจียรไนตามหัวข้อ 3.2.1.1

3.3.1.15 นำล้อยเจียรไนไปตรวจสอบโปรไฟล์และวัดความหยาบผิวด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว profilometer

3.3.1.16 นำล้อยเจียรไนไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (หลังจากตรวจสอบเสร็จก็แกะสติ๊กเกอร์ทองแดงออก)

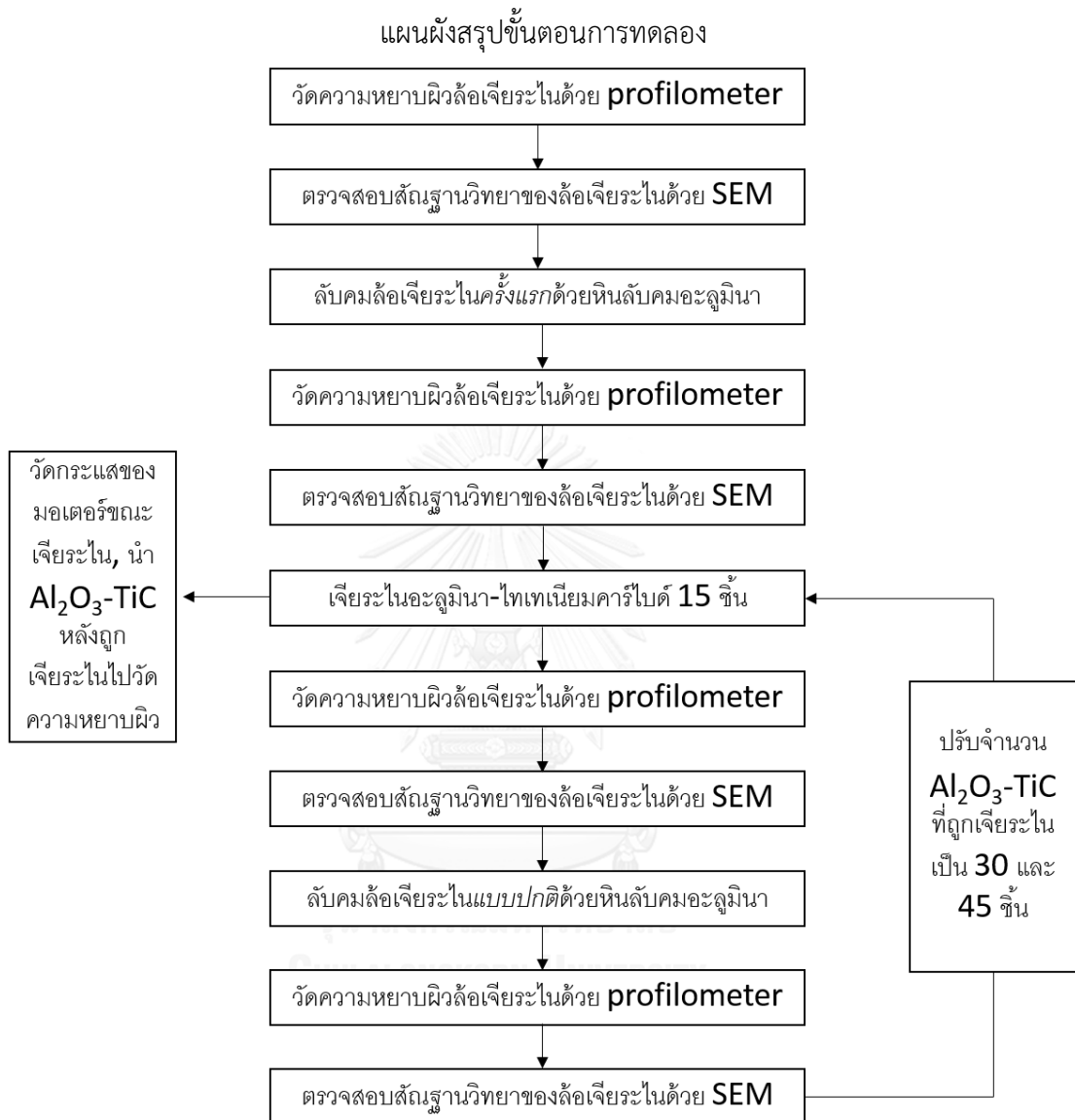
3.3.1.17 เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จำนวน 30 ชิ้น (วัดกระแสมอเตอร์ขณะเจียรไน)

3.3.1.18 ทำข้อ 3.3.1.10 – 3.3.1.16 ซ้ำอีกรอบ

3.3.1.19 เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จำนวน 45 ชิ้น (วัดกระแสมอเตอร์ขณะเจียรไน)

3.3.1.20 ทำข้อ 3.3.1.10 – 3.3.1.16 ซ้ำอีกรอบ

สามารถสรุปขั้นตอนการทดลองตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยเจียระไนแบบปกติได้ดังนี้



### 3.3.2 ขั้นตอนการทดลองเพื่อพิสูจน์ฐานวิทยาของล้อยืดระไนแบบปกติที่ผ่านการกักกรด

ขั้นตอนการทดลองเพื่อพิสูจน์ฐานวิทยาของล้อยืดระไนแบบปกติที่ผ่านการกักกรดเป็นดังนี้

3.3.2.1 นำล้อยืดระไน 4 ชั้นที่เหลือใช้มาทำการลับคมครั้งแรก

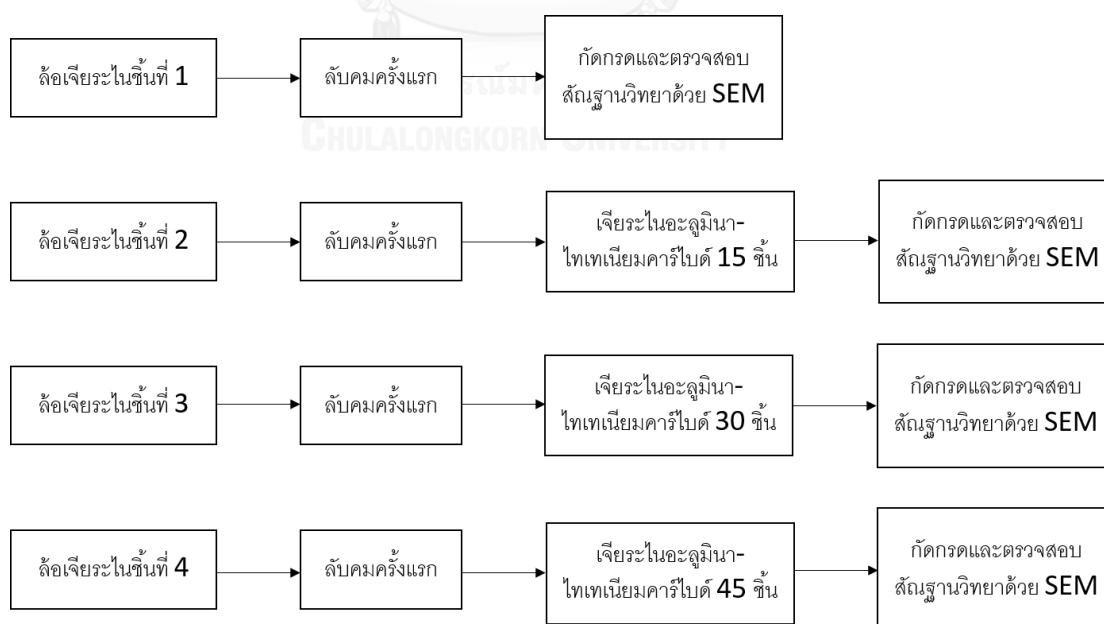
3.3.2.2 นำล้อยืดระไนชั้นที่ 1 ที่ผ่านการลับคมครั้งแรกไปตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเตรียมล้อยืดระไนตามหัวข้อ 3.2.1.2

3.3.2.3 นำล้อยืดระไนชั้นที่ 2 ที่ผ่านการลับคมครั้งแรกไปเจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น และตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเตรียมล้อยืดระไนตามหัวข้อ 3.2.1.2

3.3.2.4 นำล้อยืดระไนชั้นที่ 3 ที่ผ่านการลับคมครั้งแรกไปเจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น และตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเตรียมล้อยืดระไนตามหัวข้อ 3.2.1.2

3.3.2.4 นำล้อยืดระไนชั้นที่ 4 ที่ผ่านการลับคมครั้งแรกไปเจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 40 ชั้น และตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเตรียมล้อยืดระไนตามหัวข้อ 3.2.1.2

3.3.2.5 วัดขนาดของอนุภาคขี้ดสีที่เห็นการสึกหรอได้ชัดด้วยโปรแกรม imageJ สามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้



### 3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4.1 วิเคราะห์ลักษณะของล้อยเจียรไน (สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไน, ความหนาผิว, โปรไฟล์ของของล้อยเจียรไน) ที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ ล้อยเจียรไนที่ได้รับมา, หลังลับคม, หลังเจียรไน ขึ้นงาน 15, 30 และ 45 ชั้น

3.4.2 วิเคราะห์ความหนาผิวอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังจากถูกเจียรไนที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ หลังเจียรไน 15, 30 และ 45 ชั้น

3.4.3 วิเคราะห์กระแสของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงในขณะเจียรไนขึ้นงานที่สภาวะต่างๆ ได้แก่ ขณะเจียรไนขึ้นงาน 15, 30 และ 45 ชั้น





## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปราย

#### 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของล้อยเจียระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้ว

นำล้อยเจียระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วมาวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) โดยสุ่มตรวจบริเวณผิวของล้อยเจียระไนจำนวน 4 ตำแหน่ง ซึ่งพบว่าทั้ง 4 ตำแหน่งมีปริมาณธาตุต่างๆ ที่ใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ส่วนผสมทางเคมีของล้อยเจียระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้ว

| ส่วนผสมทางเคมีของล้อยเจียระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้ว (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) |       |      |      |      |       |      |
|---|-------|------|------|------|-------|------|
| C   | O     | Mg   | Al   | Si   | Zn    | Ca   |
| 50.45   | 31.02 | 0.76 | 0.46 | 1.48 | 15.64 | 0.17 |

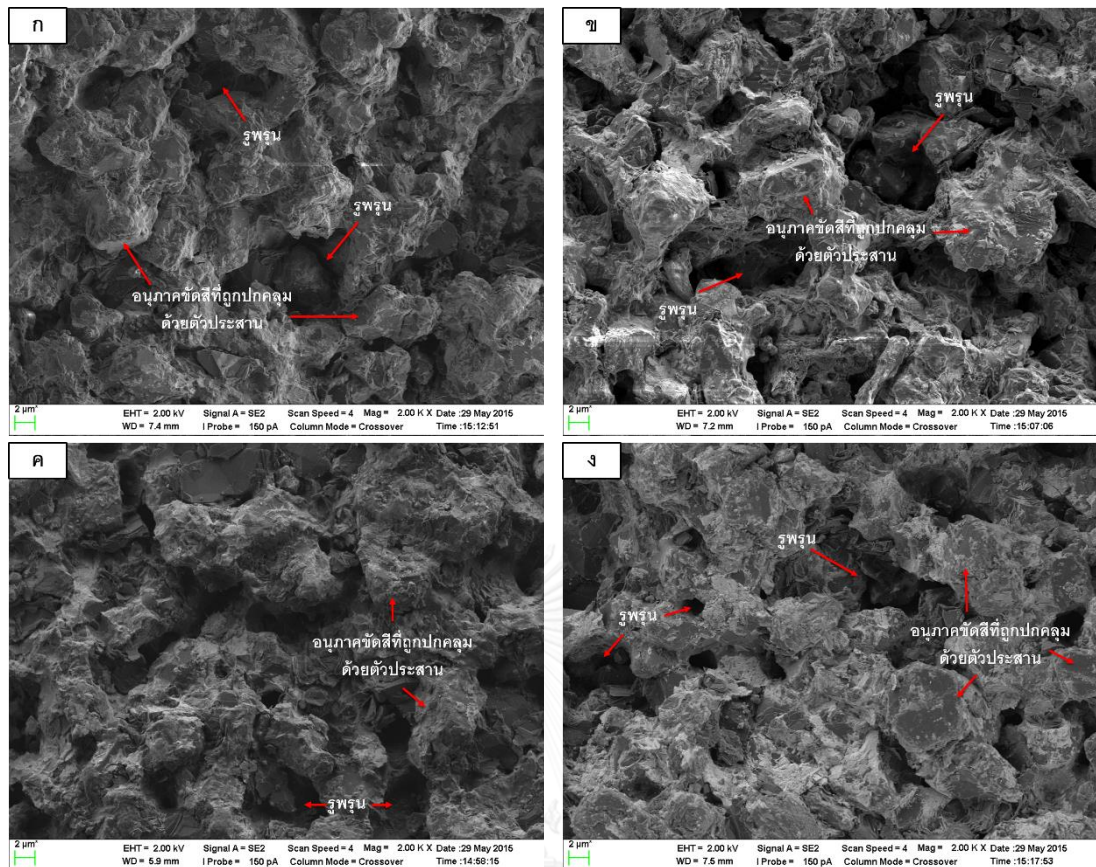
#### 4.2 ลักษณะวิทยาของล้อยเจียระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่สภาวะต่าง ๆ

##### 4.2.1 ล้อยเจียระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่ได้รับมา (As-received)

ล้อยเจียระไนที่นำมาตรวจสอบเป็นล้อยเจียระไนชิ้นใหม่ โดยทำการตรวจสอบพื้นผิวของล้อยเจียระไนบริเวณข้างๆ แผ่นทองแดงที่ได้ทำการติดไว้ข้างๆ ล้อยเจียระไน เพื่อเป็นตัวบอกตำแหน่งเมื่อนำล้อยเจียระไนไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งได้ทำการติดแผ่นทองแดงไว้และตรวจสอบเฉพาะตำแหน่งที่หนึ่ง ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะวิทยาผิวของล้อยเจียระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

ลักษณะของล้อยเจียระไนชนิดที่มีแก้วเป็นตัวประสานนั้น ทั้งสี่บริเวณตัวประสานจะปกคลุมอนุภาคขัดสีไว้ทั้งหมด จะไม่สามารถสังเกตเห็นอนุภาคขัดสีได้เลย โดยจะสังเกตเห็นอนุภาคขัดสีที่ถูกปกคลุมด้วยตัวประสานจากลักษณะที่เป็นก้อนหรืออนุภาคที่มีรูปร่างเหลี่ยม/รูปร่างเกือบกลม นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่ารูพรุนส่วนใหญ่นั้นอยู่ลึกลงไปใต้ผิวหน้าของล้อยเจียระไน ซึ่งลักษณะวิทยาของล้อยเจียระไนประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักและตรงกับผลการทดลองอื่น [13, 14] ได้แก่

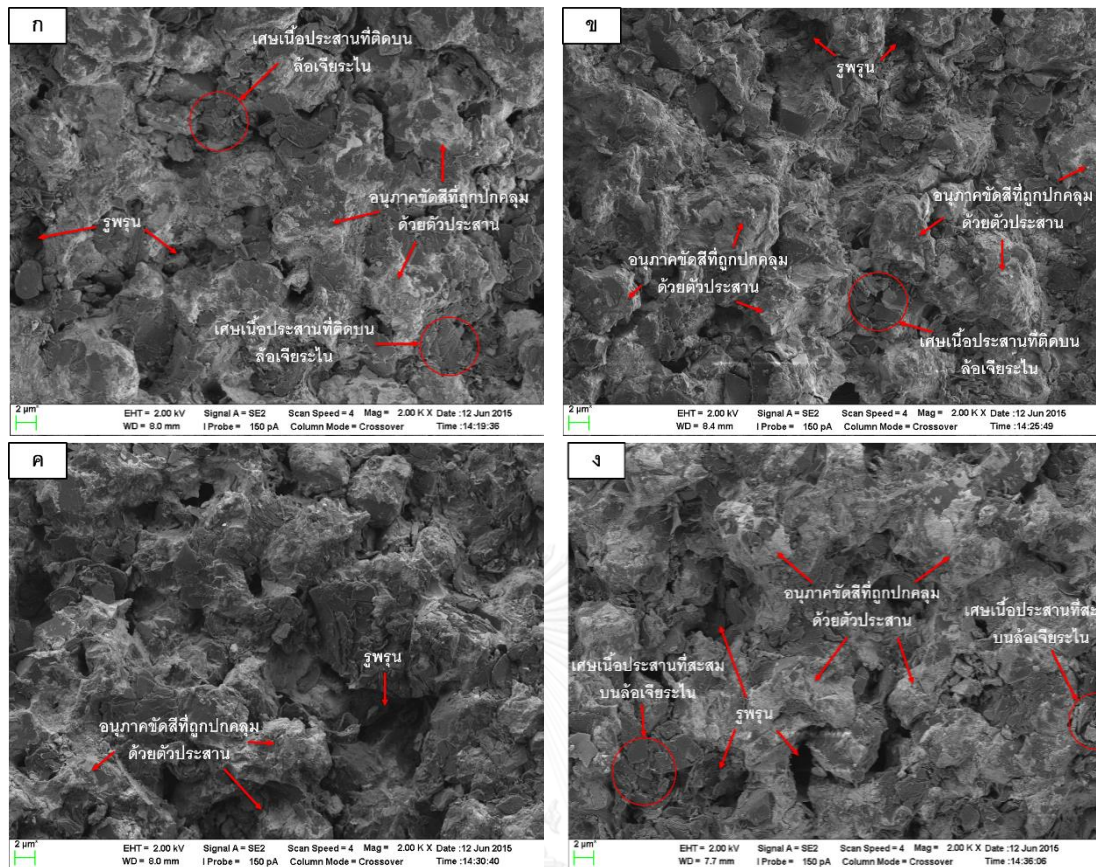
1. อนุภาคขัดสี
2. ตัวประสาน และ
3. รูพรุน



ภาพที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของล้อยีระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่รับมาที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตำแหน่งที่หนึ่งที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ก) บริเวณที่หนึ่ง, ข) บริเวณที่สอง, ค) บริเวณที่สาม และ ง) บริเวณที่สี่

#### 4.2.2 ล้อยีระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมครั้งแรก (initial dress)

ลักษณะของล้อยีระไนที่เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดจนหลังการลับคมครั้งแรกคือ ปริมาณรูพรุนที่ลดน้อยลงและดูตื้นขึ้น ดังภาพที่ 4.2 แสดงสัณฐานวิทยาของล้อยีระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 2000 เท่า จากภาพจะเห็นว่าหลังผ่านกระบวนการลับคมครั้งแรกตัวประสานจะหลุดออกและกลับมาติดสะสมอยู่บนผิวของล้อยีระไน (ภาพที่ 4.2 ก)

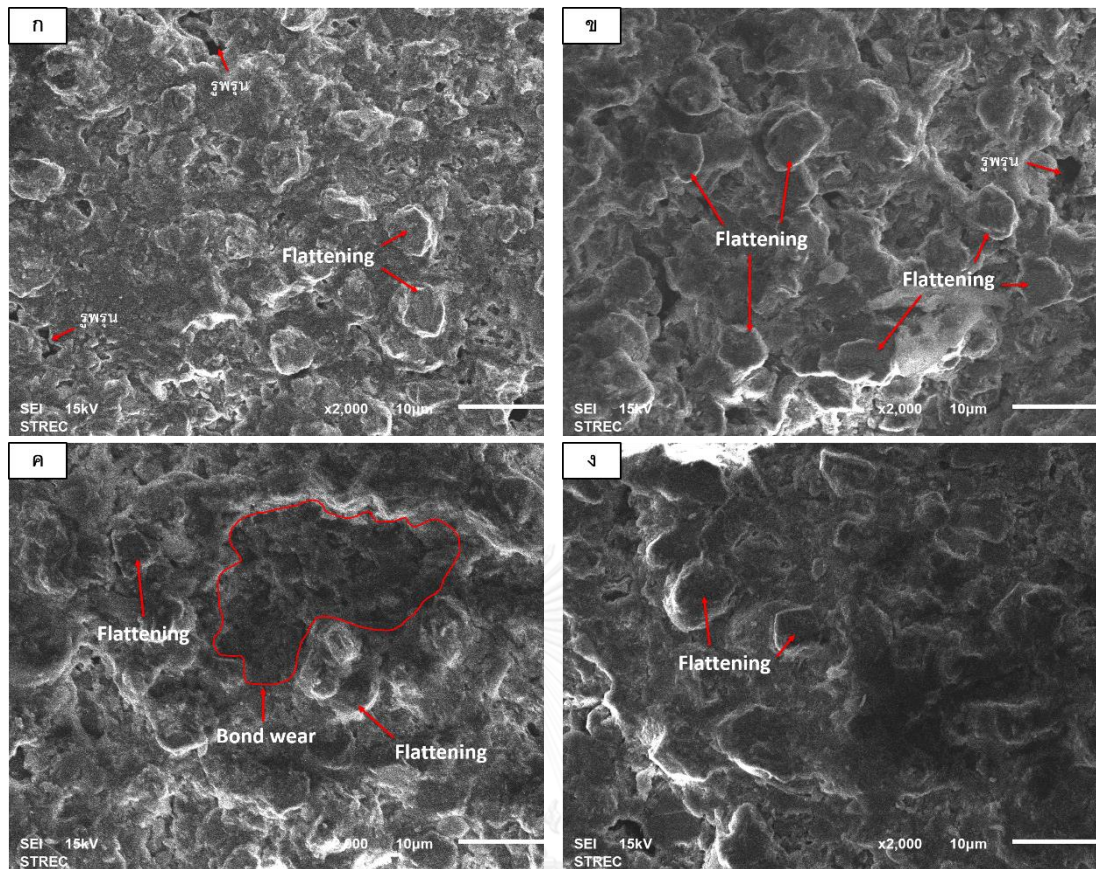


ภาพที่ 4.2 สัณฐานวิทยาของล้อยีร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมครั้งแรกที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตำแหน่งที่หนึ่งที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ก) บริเวณที่หนึ่ง, ข) บริเวณที่สอง, ค) บริเวณที่สาม และ ง) บริเวณที่สี่

นอกจากนั้นการลับคมครั้งแรกทำให้บริเวณรอบๆ ของอนุภาคขี้ดสีเรียบสม่ำเสมอ ส่งผลให้อนุภาคขี้ดสียื่นเหนือบริเวณรอบๆ มากขึ้น แต่การลับคมครั้งแรกก็ไม่สามารถทำให้ตัวประสานที่ปกคลุมอนุภาคขี้ดสีหลุดออกไปได้ ยังสามารถสังเกตตัวประสานปกคลุมอนุภาคขี้ดสีอยู่

#### 4.2.3 ล้อยีร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (15 passes)

ลักษณะของล้อยีร์ไนที่สังเกตเห็นได้ชัดที่หลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้นคือ การสึกหรอของอนุภาคขี้ดสีที่เกิดขึ้นที่เรียกว่าการเสียม (Flattening) ดังภาพที่ 4.3 แสดง สัณฐานวิทยาของล้อยีร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 2,000 เท่า จะพบการเสียมของอนุภาคขี้ดสีทั้งสี่บริเวณ



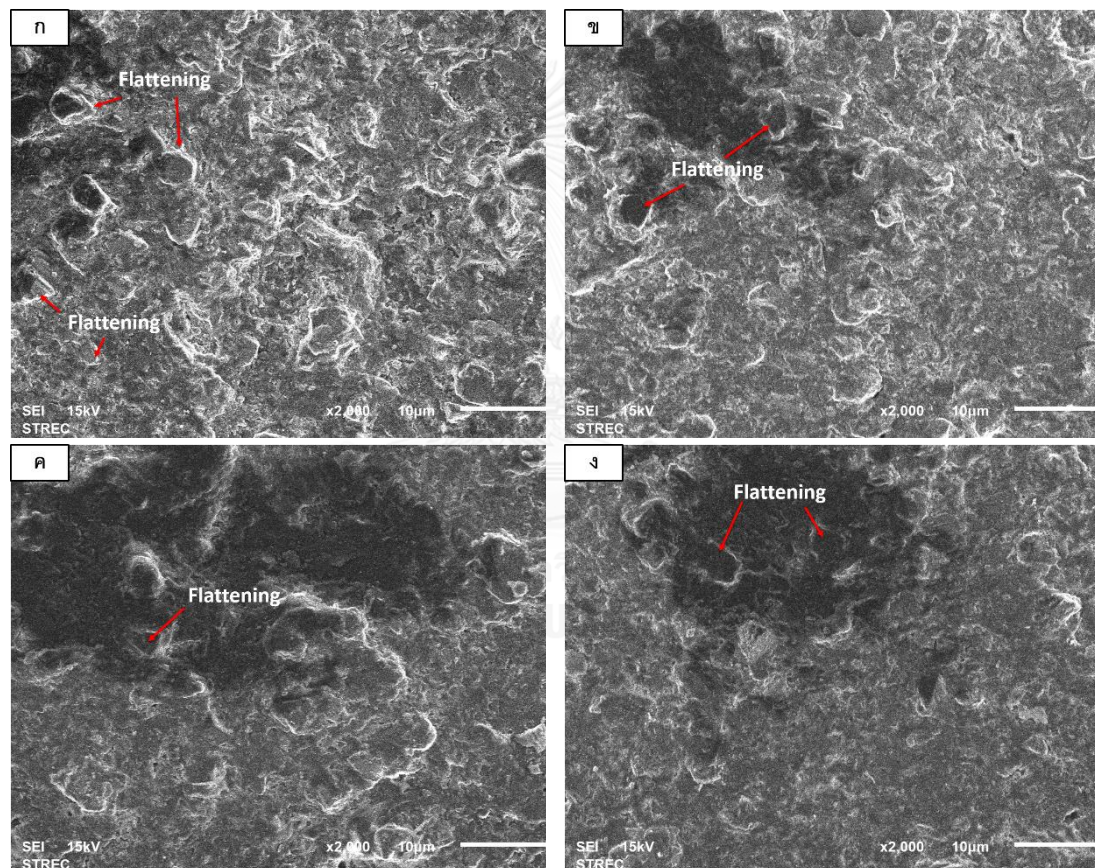
ภาพที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระโนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้นที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตำแหน่งที่หนึ่งที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ก) บริเวณที่หนึ่ง, ข) บริเวณสอง, ค) บริเวณที่สาม และ ง) บริเวณที่สี่

สิ่งที่สังเกตได้นอกจากการสึกหรอแบบการเสียดสีของอนุภาคขั้วสี การสึกหรอของตัวประสาน (bond wear) ก็สามารถสังเกตได้เช่นกัน ดังภาพที่ 4.3 ค) จากภาพทั้งสี่พบว่าปริมาณรูพรุนลดน้อยลงเช่นกันเมื่อเทียบกับปริมาณรูพรุนของล้อยืดระโนหลังจากการลับคมครั้งแรก ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากการสะสมของเศษตัวประสานร่วมกับเศษอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ถูกเจียระไน และเมื่อสังเกตความสูงของอนุภาคขั้วสีที่โผล่เหนือตัวประสานพบว่า ความสูงของอนุภาคขั้วสีที่อยู่เหนือตัวประสานนั้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับความสูงของอนุภาคขั้วสีที่โผล่เหนือตัวประสานของล้อยืดระโนหลังลับคมครั้งแรก

นอกจากนั้นในบางบริเวณผิวของล้อยืดระโนไม่เกิดการสึกหรอมากนัก (ภาพที่ 4.3 ง) สังเกตได้ว่าลักษณะรูปร่างของอนุภาคขั้วสีมีความเปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะรูปร่างของอนุภาคขั้วสีของล้อยืดระโนที่ได้รับมาและหลังลับคมครั้งแรก (รูปร่างเป็นเหลี่ยม/เกือบกลม)

#### 4.2.4 ล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (15 & dress)

ภาพที่ 4.4 แสดงสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น พบว่าปริมาณรูพรุนบนผิวของล้อเจียรไนที่พบนั้นมีปริมาณน้อยลงทั้งสี่บริเวณ (ลักษณะคล้ายกับล้อเจียรไนที่ไม่ได้ลับคม) ส่วนลักษณะรูปร่างของอนุภาคขัดสีไม่มีความเปลี่ยนแปลง กล่าวคือยังคงการสึกหรอแบบการเสียม (Flattening) ในบริเวณส่วนใหญ่ และยังคงสภาพเดิมเหมือนล้อเจียรไนที่ได้รับมาและหลังการลับคมในบริเวณส่วนน้อย



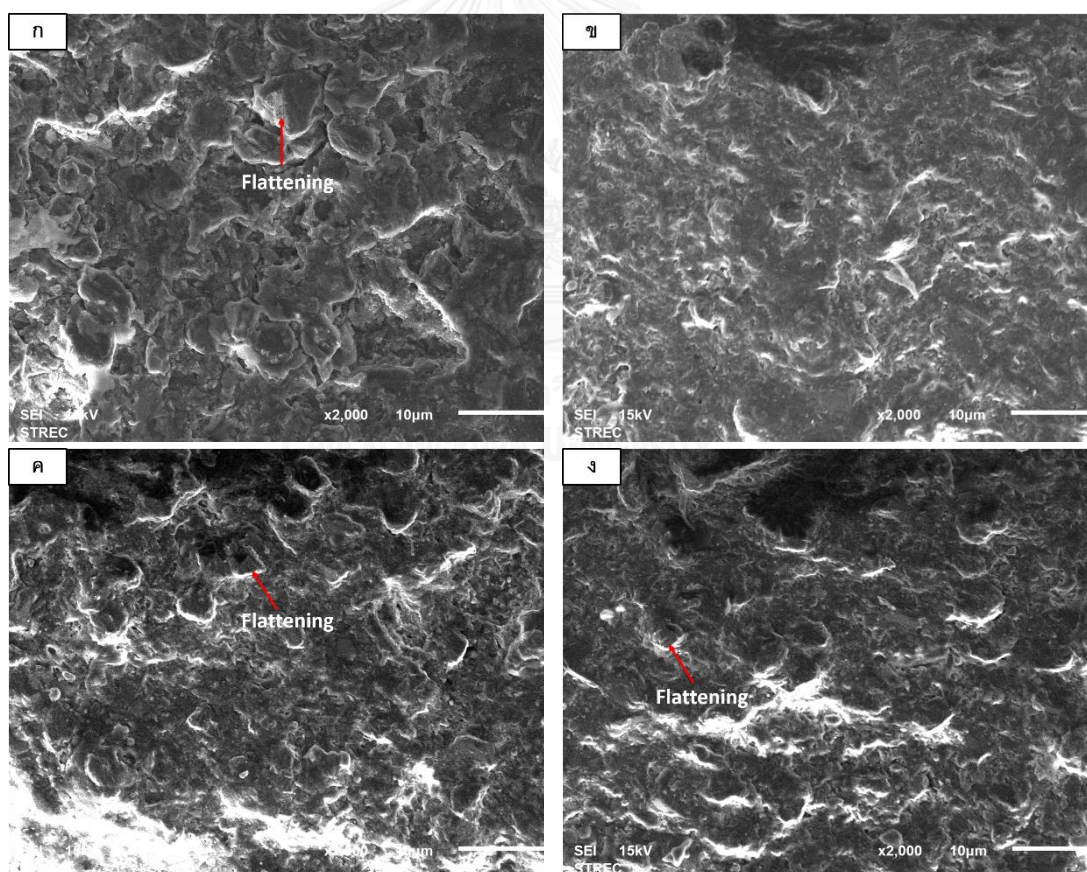
ภาพที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้นที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตำแหน่งที่หนึ่งที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ก) บริเวณที่หนึ่ง, ข) บริเวณที่สอง, ค) บริเวณที่สาม และ ง) บริเวณที่สี่

จะเห็นว่าสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนที่สภาวะนี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นอนุภาคขัดสีได้ชัดเจน และเห็นได้ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับล้อเจียรไนที่ได้รับมา, หลังลับคมครั้งแรก และ หลังใช้

เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น เนื่องจากคุณสมบัติของล้อยเจียรไนชนิดนี้ที่สร้างรูพรุน เพื่อกักเก็บเศษวัสดุ (ตัวประสาน, เนื้อชิ้นงาน และเนื้อหินลับคม) ขณะเจียรไน ทำให้เมื่อนำล้อยเจียรไนมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงเกิดจุดวาบเกิดขึ้น เนื่องจากนำไฟฟ้าได้น้อยลง

#### 4.2.5 ล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (30 passes)

ภาพที่ 4.5 ก) แสดงสัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นที่ตำแหน่งที่หนึ่ง พบอนุภาคขัดสียื่นเหนือบริเวณข้างๆ อย่างมาก (excessive grain protrusion) ซึ่งหากเป็นไปตามทฤษฎี [4] อนุภาคขัดสีเม็ดนี้จะเกิดการสึกหรอแบบการหลุดออกทั้งอนุภาค (grain break-out) ขณะใช้งานในเวลาถัดไป เนื่องจากเป็นอนุภาคที่ได้รับแรงสูงสุดขณะทำการเจียรไน

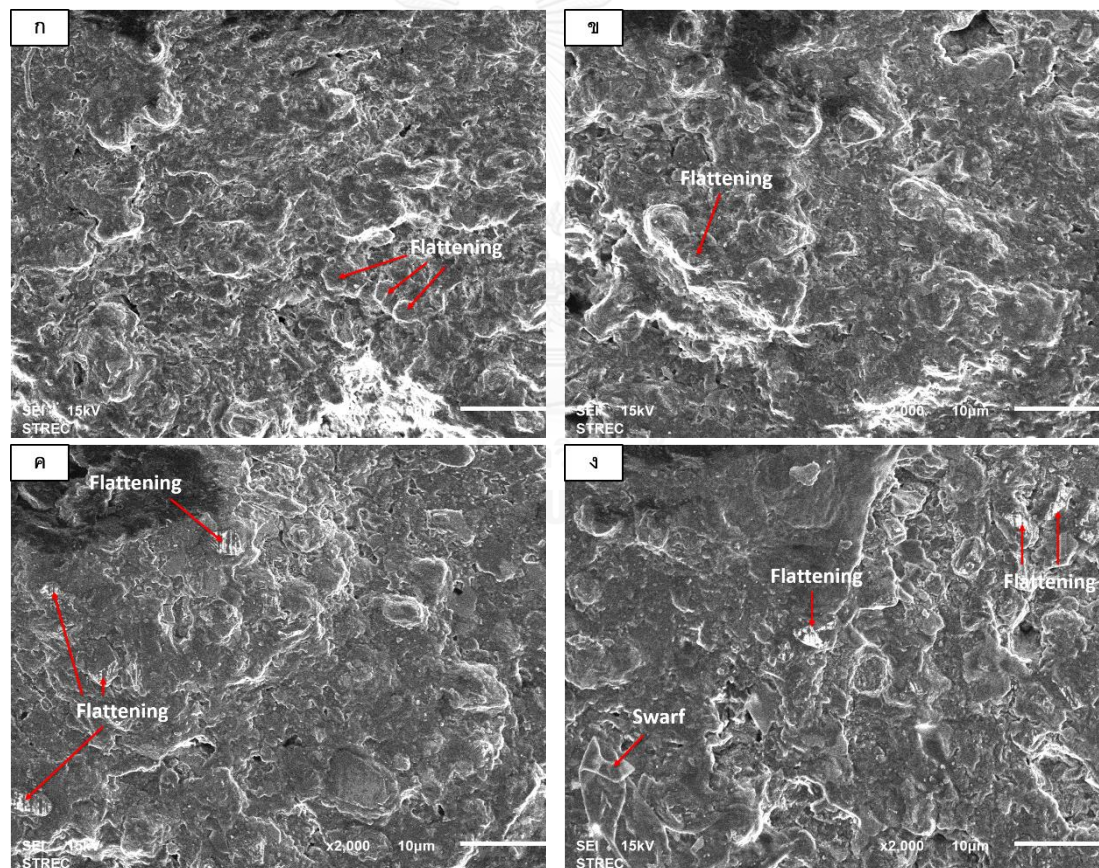


ภาพที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตำแหน่งที่หนึ่งที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ก) บริเวณที่หนึ่ง, ข) บริเวณที่สอง, ค) บริเวณที่สาม และ ง) บริเวณที่สี่

ส่วนภาพ ข), ค), และ ง) แสดงบริเวณที่สอง, สาม และ สี่ ตามลำดับ ยังคงสามารถสังเกตเห็นการสึกหรอแบบเสียมคม แต่เนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.4) ย่อหน้าที่สอง จึงทำให้ไม่สามารถเห็นอนุภาคขัดสีได้ชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่าที่สภาวะนี้มีปริมาณรูพรุนน้อย

#### 4.2.6 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (30 & dress)

ภาพที่ 4.6 แสดงสัญญาณวิทยาของล้อเจียร์ไนหลังลับคมต่อจากการเจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นพบว่าแม้จะทำการลับคมก็ยังไม่สามารถกำจัดเศษวัสดุ (Swarf) ที่ติดบนล้อเจียร์ไนเพื่อให้ล้อเจียร์ไนสะอาดได้ดังแสดงดังภาพที่ 4.6 ง) แสดงถึงการลับคมแบบปกติหลังการใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้สัญญาณวิทยาของล้อเจียร์ไนกลับคืนสภาพเดิมเหมือนหลังลับคมครั้งแรกได้

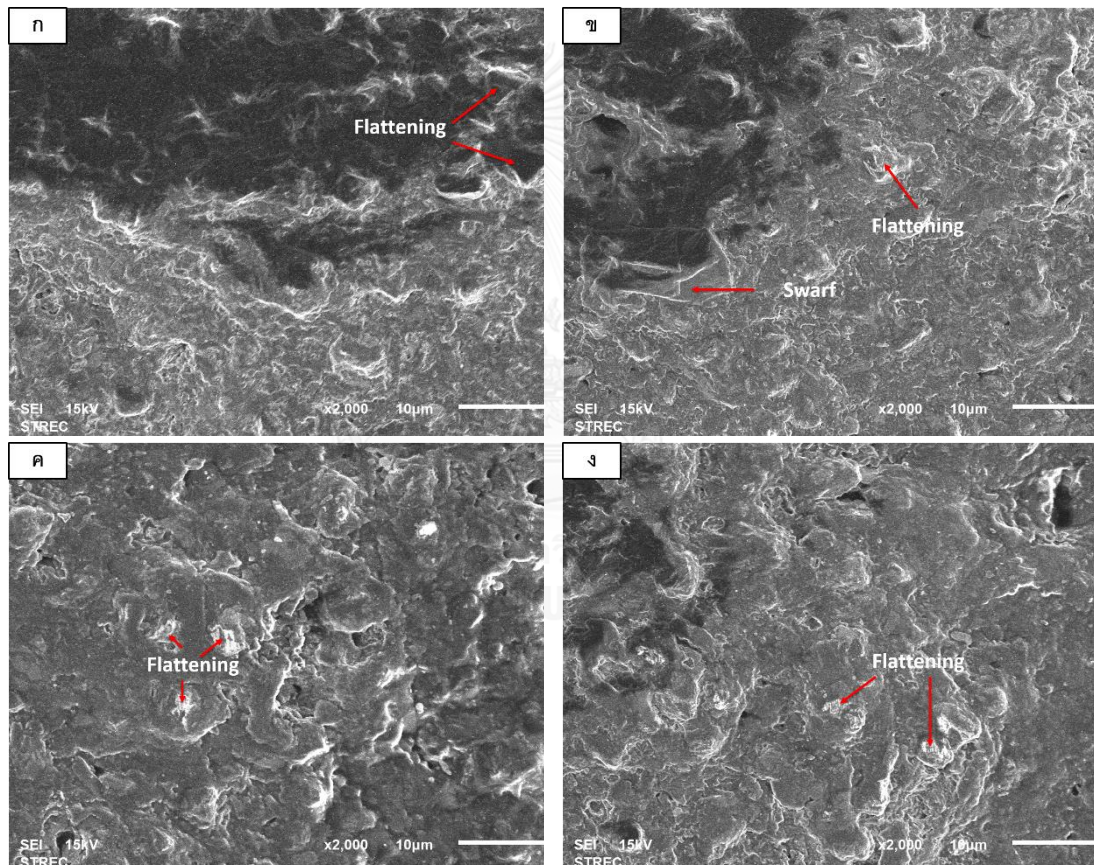


ภาพที่ 4.6 สัญญาณวิทยาของล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมต่อจากการเจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตำแหน่งที่หนึ่งที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ก) บริเวณที่หนึ่ง, ข) บริเวณที่สอง, ค) บริเวณที่สาม และ ง) บริเวณที่สี่

ในทำนองเดียวกับหัวข้อที่ 4.2.4) ย่อหน้าที่สอง ทำให้ไม่สามารถสังเกตอนุภาคขดสีได้ชัดเจน แต่ก็ยังสามารถสังเกตลักษณะของอนุภาคขดสีที่พบที่สภาวะนี้คือการสึกหรอแบบการเสียดสี ส่วนปริมาณรูพรุนบนล้อยีระไนที่สภาวะนี้ยังคงสามารถสังเกตได้แต่มีในปริมาณที่น้อย

#### 4.2.7 ล้อยีระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา - ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น (45 passes)

ภาพที่ 4.7 แสดงสัญญาณวิทยาของล้อยีระไนหลังลับคมต่อจากการเจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นพบว่าลักษณะของอนุภาคขดสีที่สังเกตได้ทั้งสี่ตำแหน่งนั้นมีลักษณะของการสึกหรอแบบเสียดสี และยังมีเศษวัสดุที่สังเกตได้ชัดเจน (ภาพ 4.7 ข) ที่สภาวะนี้



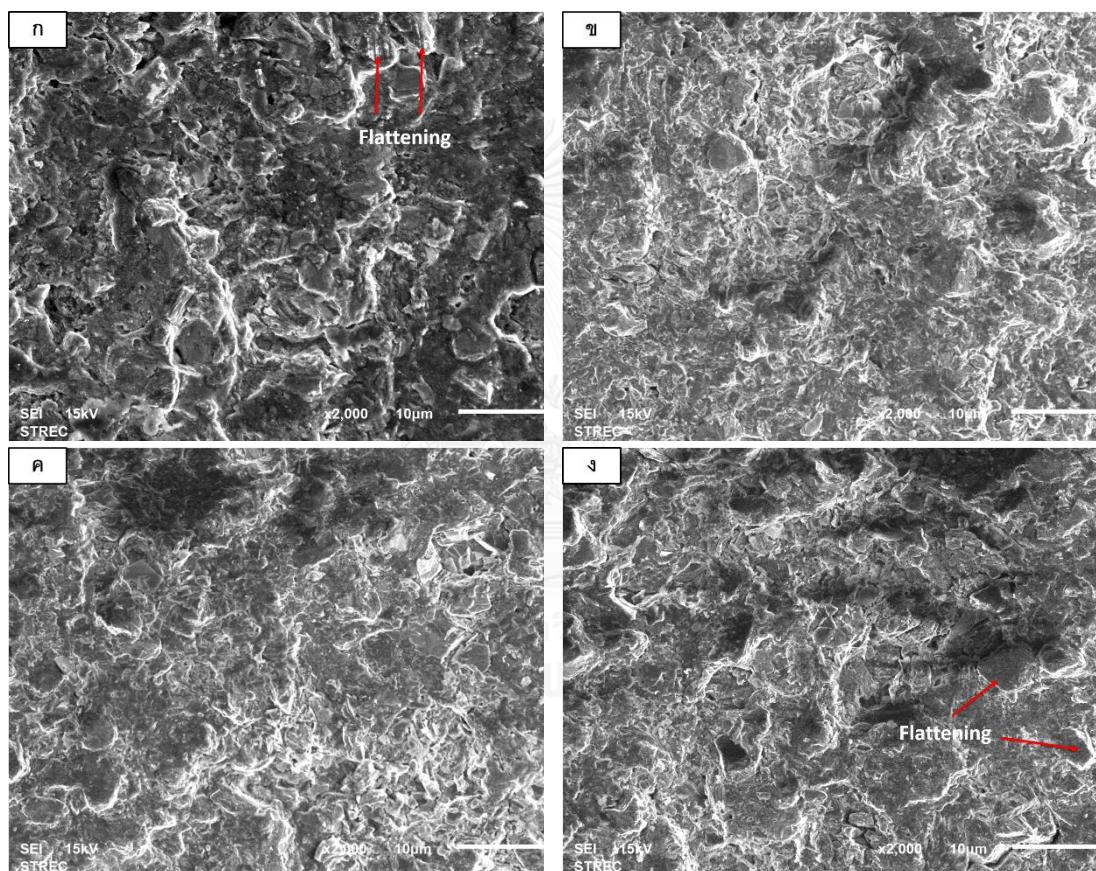
ภาพที่ 4.7 สัญญาณวิทยาของล้อยีระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมต่อจากการเจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตำแหน่งที่หนึ่งที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ก) บริเวณที่หนึ่ง, ข) บริเวณที่สอง, ค) บริเวณที่สาม และ ง) บริเวณที่สี่

ทั้งสี่ตำแหน่งยังแสดงปริมาณรูพรุนที่น้อย เนื่องจากผิวของล้อยีระไนอัดแน่นไปด้วยเศษวัสดุ และไม่สามารถสังเกตอนุภาคขดสีได้ชัดเจน



#### 4.2.8 ล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น (45 & dress)

ลักษณะของล้อเจียรไนที่แตกต่างกับล้อเจียรไนที่สภาวะหลังลับคมต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนคือลักษณะของตัวประสานหรือบริเวณที่อยู่รอบ ๆ อนุภาคขัดสี กล่าวคือที่สภาวะนี้บริเวณดังกล่าวมีช่องว่างมากขึ้น อีกนัยหนึ่งคือสามารถบอกได้ว่าการลับคมที่สภาวะนี้คือการกำจัดเนื้อวัสดุที่อัดแน่นที่ติดในรูพรุนของล้อเจียรไนที่เกิดจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น



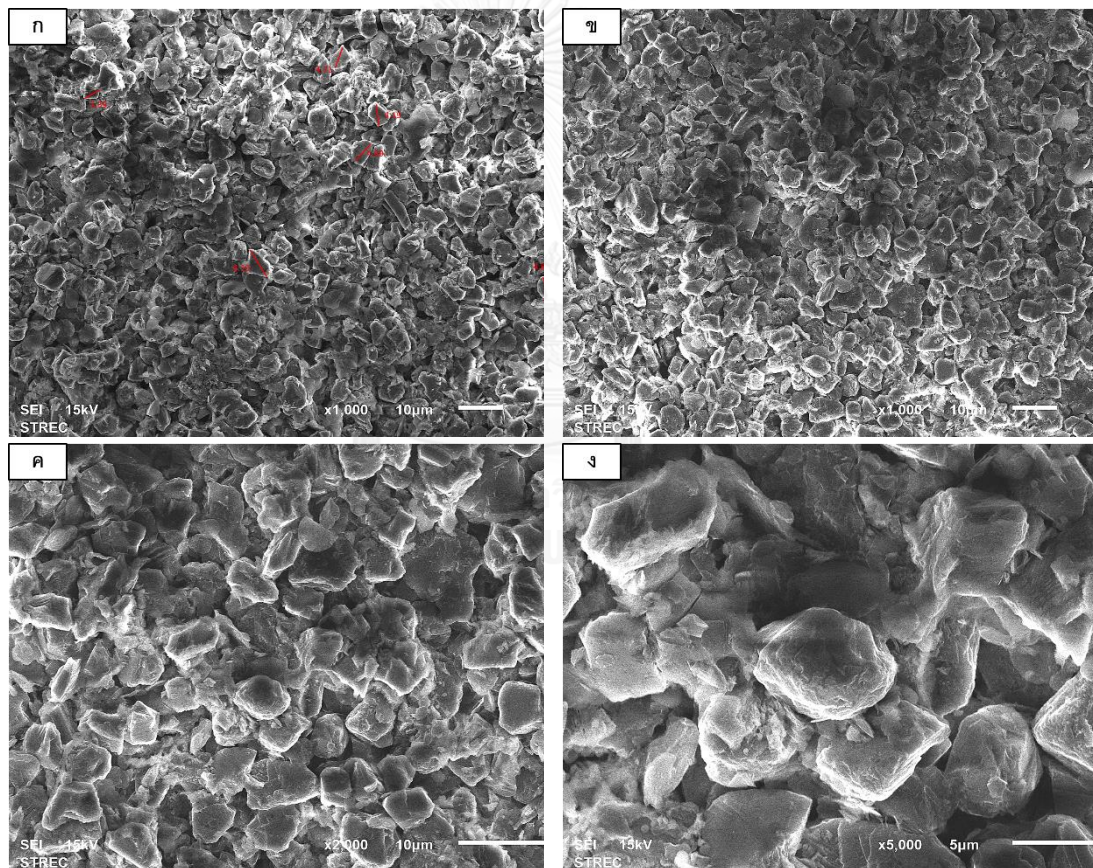
ภาพที่ 4.8 สันฐานวิทยาของล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตำแหน่งที่หนึ่งที่กำลังขยาย 2,000 เท่า ก) บริเวณที่หนึ่ง, ข) บริเวณที่สอง, ค) บริเวณที่สาม และ ง) บริเวณที่สี่

ส่วนลักษณะของอนุภาคขัดสียังสังเกตเห็นการสึกหรอแบบเสียมคม ดังภาพที่ 4.7 ก) และ ง) ปริมาณรูพรุนมีมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะหลังการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น

### 4.3 ลักษณะวิทยาของล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่สภาวะต่าง ๆ ที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้ว

#### 4.3.1 ล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมครั้งแรก

หลังจากนำล้อยเจียรไนที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงดังภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าตัวประสานที่ปกคลุมอนุภาคขัดสีนั้นถูกกำจัดออกไปหมดจนสามารถเห็นลักษณะของอนุภาคขัดสีได้ชัดเจน พบว่าหลังการลับคมครั้งแรกอนุภาคขัดสีเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งมีลักษณะการเสียคมการอนุภาคขัดสีเกิดขึ้นเล็กน้อยสามารถสังเกตเห็นได้จากภาพทุกภาพและทุกกำลังขยาย ภาพที่ 4.9 ก) แสดงตัวอย่างบางส่วนของ การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขัดสี



ภาพที่ 4.9 ลักษณะวิทยาของล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังลับคมครั้งแรกที่

ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วและตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

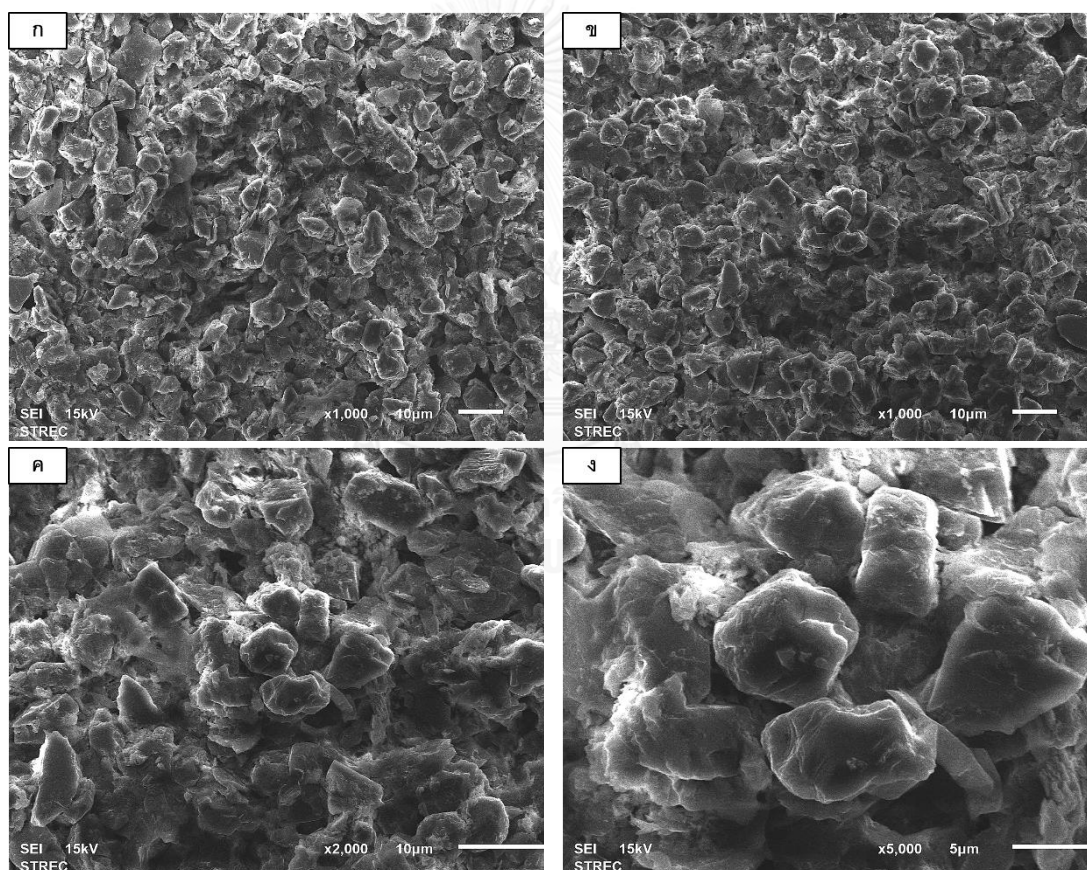
ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ข) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า,

ค) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ ง) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เมื่อตรวจสอบที่กำลังขยายสูงดังภาพที่ 4.9 ง) นั้นจะเห็นว่าอนุภาคขดสี่แทบจะไม่เกิดการเสียดมเลย แต่ที่เห็นการเสียดมของอนุภาคขดสี่ที่กำลังขยายต่ำนั้นอาจเป็นเพราะล้อยเจียรไนที่นำมาตรวจสอบนั้นเป็นล้อยเจียรไนที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

#### 4.3.2 ล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น

ภาพที่ 4.10 แสดงสัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้นหลังกัดกรดด้วยกรดกัดแก้ว พบว่าเห็นการสึกหรอของอนุภาคขดสี่แบบเสียดมได้อย่างชัดเจนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับล้อยเจียรไนหลังลับคมครั้งแรก ซึ่งสามารถสังเกตได้ทุกบริเวณและทุกกำลังขยาย

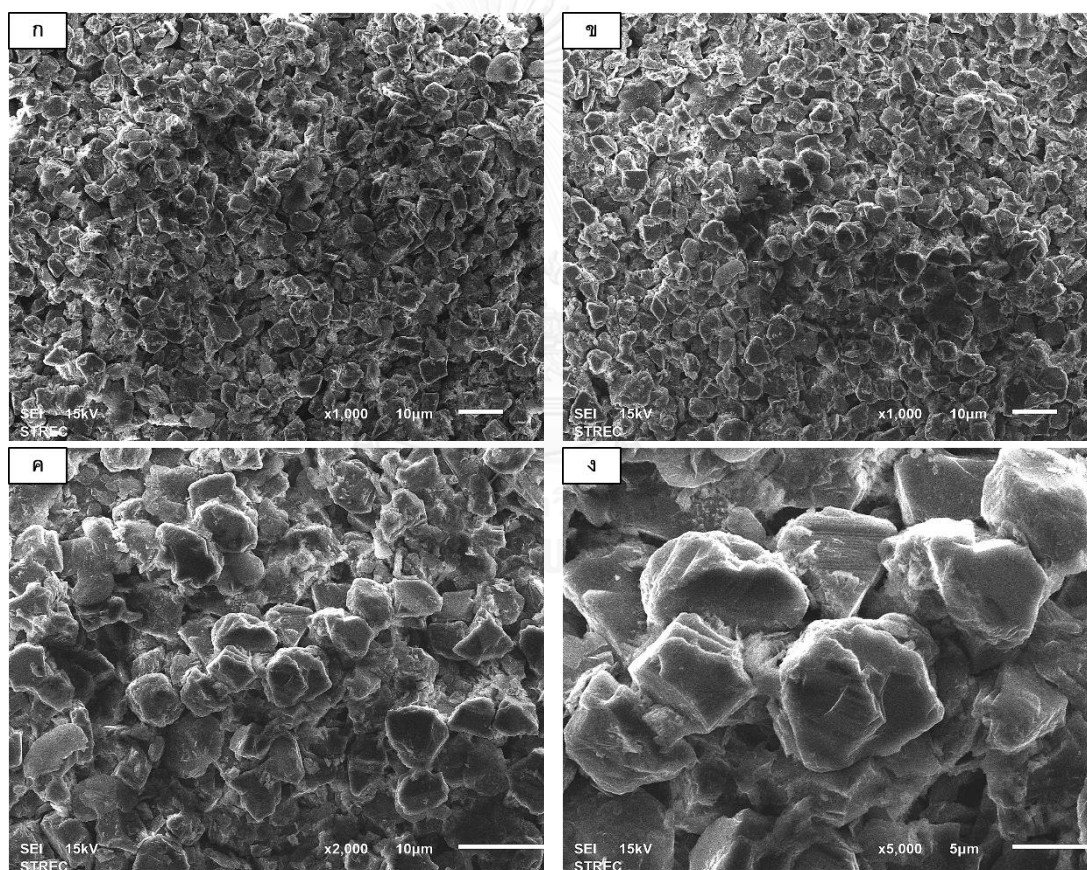


ภาพที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้นที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วและตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ข) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ค) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ ง) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เมื่อนำภาพไปวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขดสีที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัด มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 4.451 ไมโครเมตร, ค่าสูงสุด 6.20 ไมโครเมตร, ค่าต่ำสุด 3.18 ไมโครเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.70

#### 4.3.3 ล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น

ลักษณะของอนุภาคขดสีที่สภาวะหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นจะคล้ายคลึงกับลักษณะของอนุภาคขดสีที่สภาวะหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น ดังจะเห็นดังภาพที่ 4.11 ซึ่งยังคงพบการสึกหรอแบบเสียมทั้งสองบริเวณและเมื่อสังเกตที่กำลังขยาย 5,000 เท่าก็สามารถเห็นการสึกหรอได้ชัดเจนมากขึ้น ดังภาพที่ 4.11 ง)

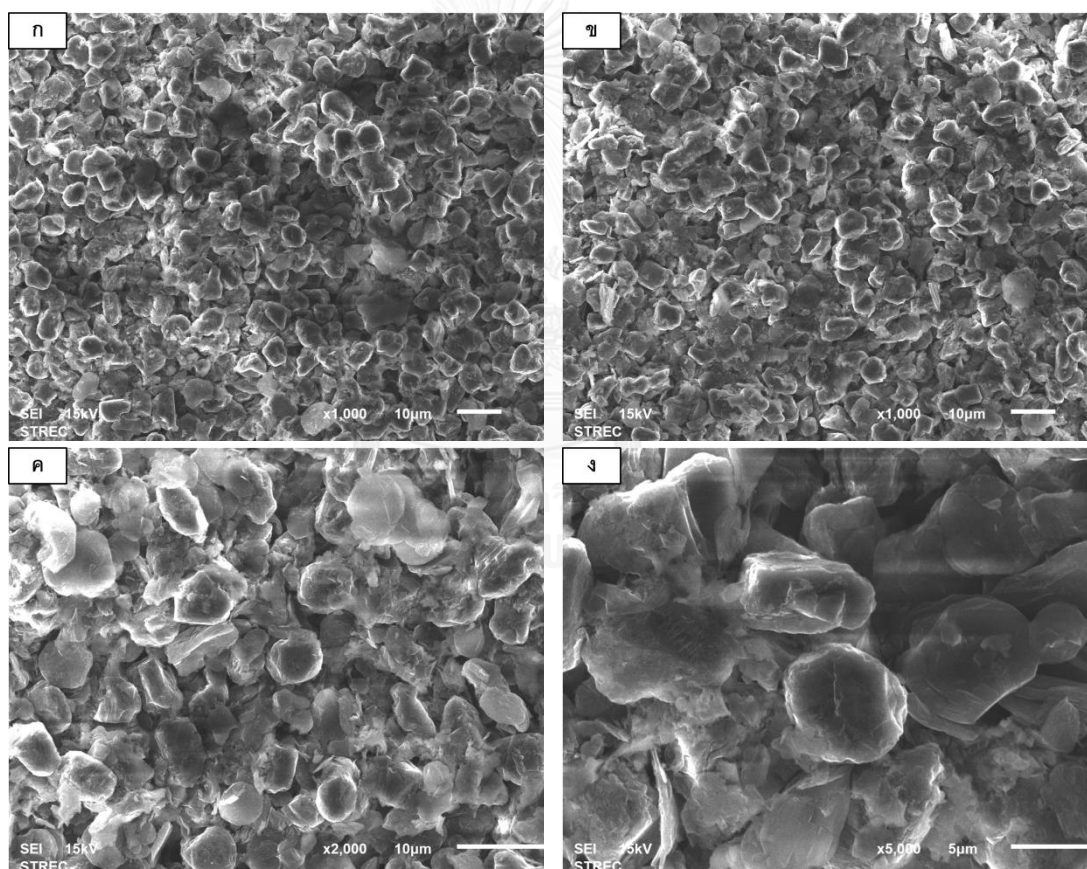


ภาพที่ 4.11 สัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วและตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ข) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ค) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ ง) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เมื่อนำภาพไปวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขดสีที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน มีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 5.21 ไมโครเมตร, ค่าสูงสุด 7.07 ไมโครเมตร, ค่าต่ำสุด 4.03 ไมโครเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.60 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่สภาวะนี้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขดสีเฉลี่ยมีค่ามากกว่าค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคขดสีเฉลี่ยที่สภาวะหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น

#### 4.3.4 ล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น

ลักษณะของอนุภาคขดสีของล้อเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น จะเห็นได้ว่าสามารถสังเกตการสึกหรอได้อย่างชัดเจน



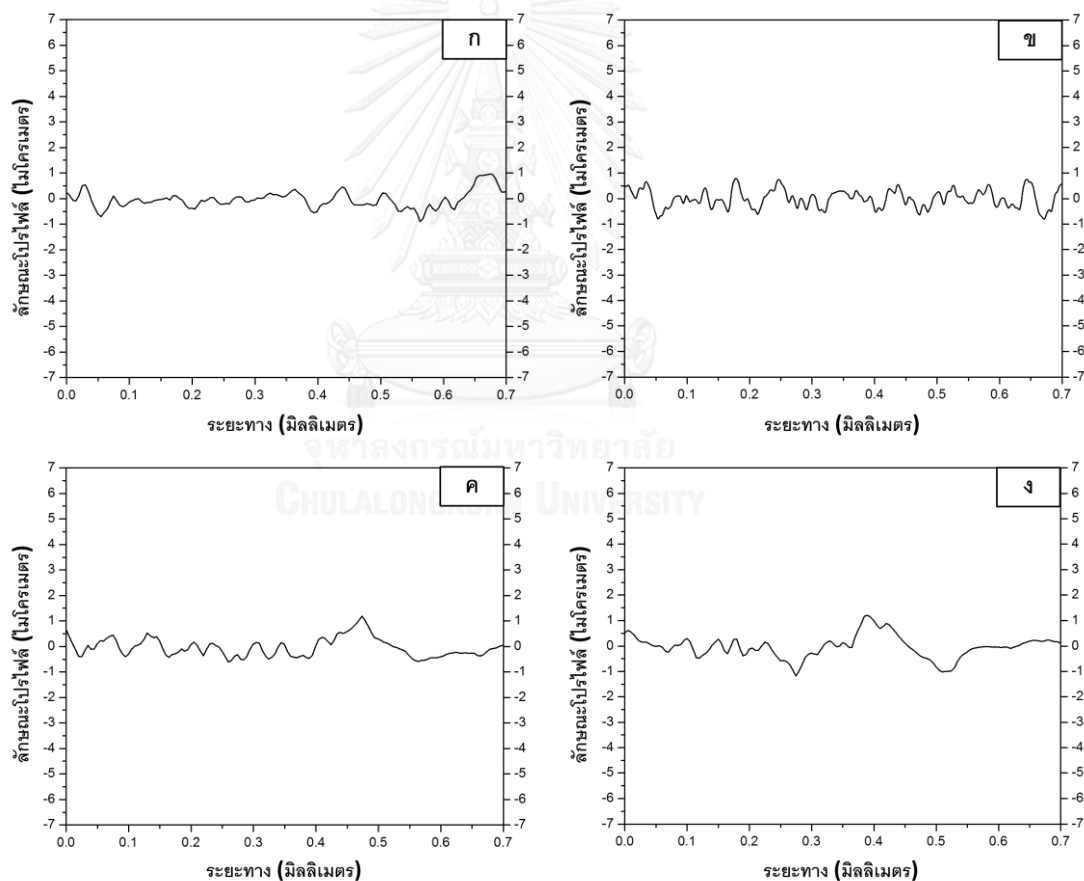
ภาพที่ 4.12 ลักษณะวิทยาของล้อเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วและตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ข) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า, ค) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ ง) ตำแหน่งที่สอง ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

โดยลักษณะของการสีกหรือจะเป็นแบบเสียมและดูรุนแรงกว่าการสีกหรือของอนุภาคชนิดที่ สภาวะหลังใช้อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 และ 30 ครั้งอย่างเห็นได้ชัดดังภาพที่ 4.12 ทั้งสอง บริเวณและทุกกำลังขยาย

เมื่อนำภาพไปวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคชนิดที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน มีค่าเส้น ผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 6.30 ไมโครเมตร, ค่าสูงสุด 8.20 ไมโครเมตร, ค่าต่ำสุด 5.30 ไมโครเมตร และค่า เบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.73 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่สภาวะนี้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคชนิดเฉลี่ยมีค่า มากกว่าค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคชนิดเฉลี่ยที่สภาวะหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 และ 30 ขึ้น

#### 4.4 โพรไฟล์และความหยาบผิวของล้อยเจียรไน

##### 4.4.1 ล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วที่ได้รับมา (as-received)



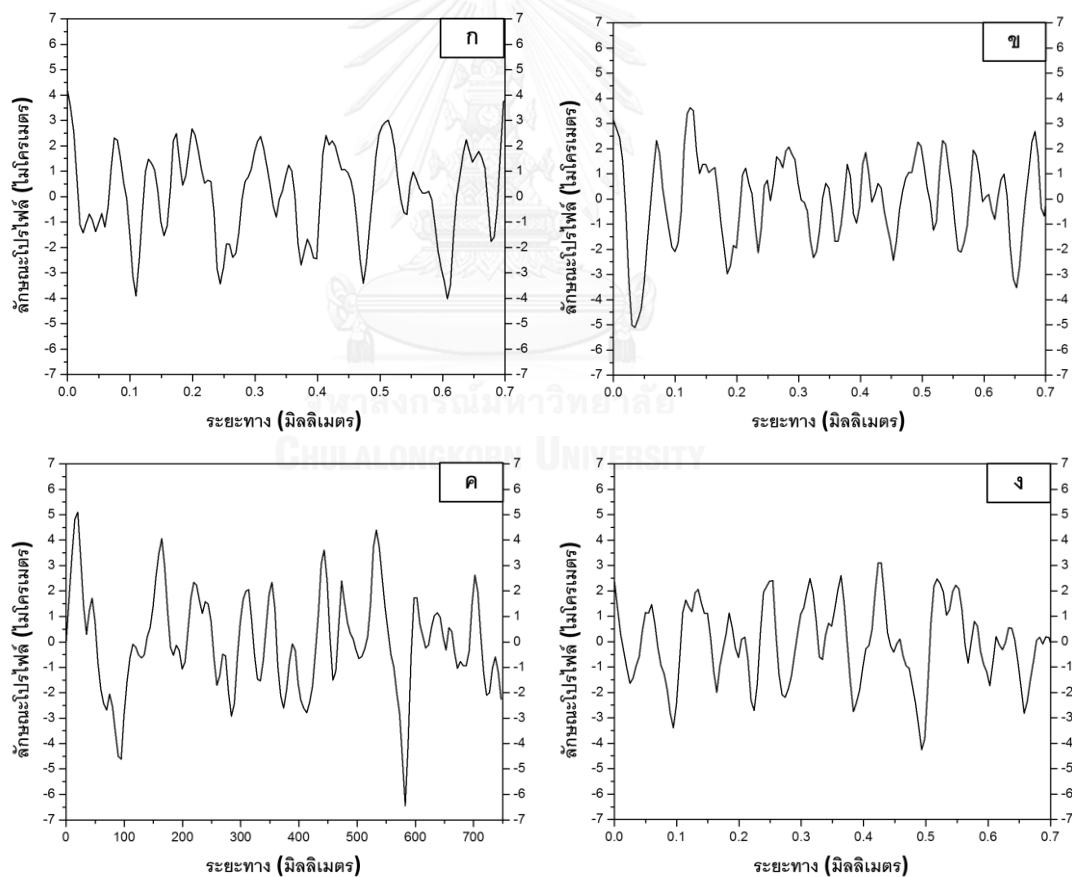
ภาพที่ 4.13 ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนที่ได้รับมาเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร

ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง, ข) ตำแหน่งที่สอง, ตำแหน่งที่สาม และ ง) ตำแหน่งที่สี่

ภาพที่ 4.13 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนที่ได้รับมา จะเห็นว่าลักษณะของล้อยเจียรไนมีความสูง-ต่ำของพื้นผิวที่ไม่มากคืออยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ไมโครเมตร ซึ่งหมายถึงผิวของล้อยเจียรไนค่อนข้างเรียบ เมื่อสังเกตระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดถึงจุดสูงสุด (Peak to peak) และจุดต่ำสุดถึงจุดต่ำสุด (Valley to valley) พบว่ามีความกว้างไม่มากนัก เมื่อสังเกตความตรงของล้อยเจียรไนจะเห็นว่า ล้อยเจียรไนมีความตรงมาก ซึ่งดูจากความสูงของพีคถึงเส้นศูนย์ และความต่ำของวัลเลย์ถึงเส้นศูนย์อยู่ในระดับเดียวกันตลอดแนวระยะการวัด

ระยะห่างระหว่างพีคและวัลเลย์มีความสม่ำเสมอเฉพาะบางบริเวณ และเมื่อคำนวณค่าความสูง-ต่ำของล้อยเจียรไนเป็นความหยาบผิวเฉลี่ยพบว่าความหยาบผิวเฉลี่ยของล้อยเจียรไนที่ได้รับมามีค่าเท่ากับ 0.243 ไมโครเมตร

#### 4.4.2 ล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมครั้งแรก (as-dressed)

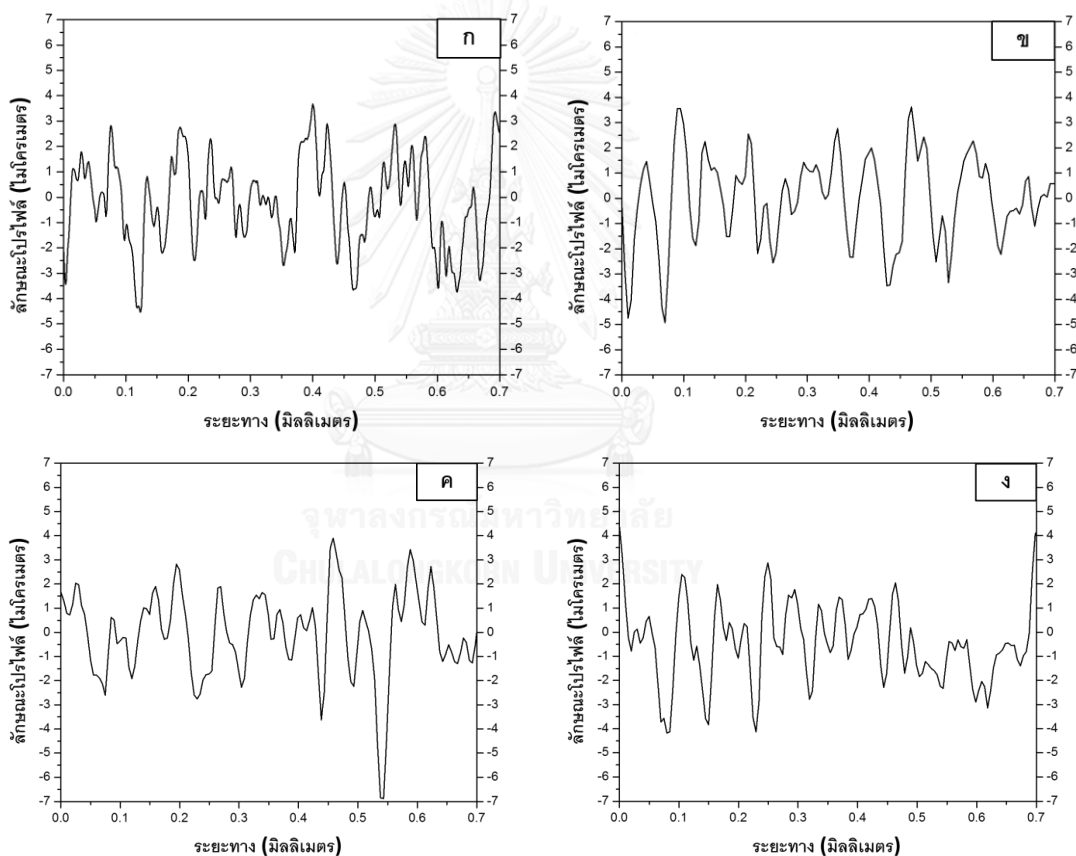


ภาพที่ 4.14 ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนหลังการลับคมครั้งแรกเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง, ข) ตำแหน่งที่สอง, ค) ตำแหน่งที่สาม และ ง) ตำแหน่งที่สี่

ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยีระไนหลังลับคมครั้งแรกเป็นดังภาพ 4.14 พบว่าค่าความสูง-ต่ำของล้อยีระไนหลังลับคมครั้งแรกมีค่าอยู่ระหว่าง -6.5 ถึง 4 ไมโครเมตร ซึ่งหมายถึงผิวของล้อยีระไนหยาบขึ้นเมื่อเทียบกับผิวของล้อยีระไนที่ได้รับมา

ระยะห่างระหว่างวัลเลย์ถึงวัลเลย์มีค่ามากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างวัลเลย์ถึงวัลเลย์ของล้อยีระไนที่ได้รับมา ล้อยีระไนค่อนข้างตรงเหตุผลเดียวกับหัวข้อ 4.4.1 และเมื่อคำนวณค่าความสูง-ต่ำของล้อยีระไนเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ยพบว่ามีความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 1.250 ไมโครเมตร

#### 4.4.3 ล้อยีระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (15 passes)



ภาพที่ 4.15 ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยีระไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้นเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง, ข) ตำแหน่งที่สอง, ค) ตำแหน่งที่สาม และ ง) ตำแหน่งที่สี่

ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยีระไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้นแสดงดังภาพที่ 4.15 มีค่าความสูง-ต่ำอยู่ที่ -7 ถึง 4 ไมโครเมตร ซึ่งมีค่าต่ำสุดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบ

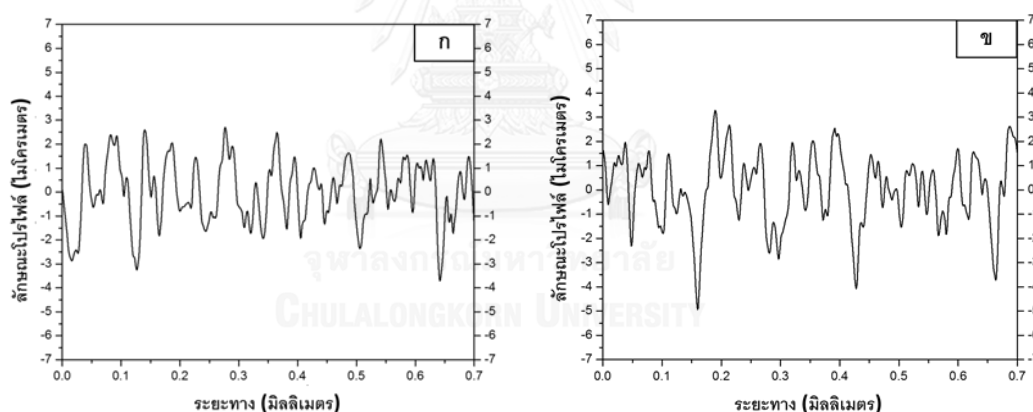


กับค่าต่ำสุดของล้อยเจียรไนหลังลับคมครั้งแรก แต่ความสูง-ต่ำโดยรวมนั้นมีค่าน้อยกว่าความสูง-ต่ำของล้อยเจียรไนหลังลับคมครั้งแรก ระยะห่างระหว่างวัลเลย์ถึงวัลเลย์มีค่าใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างวัลเลย์ถึงวัลเลย์ของล้อยเจียรไนหลังลับคมครั้งแรก

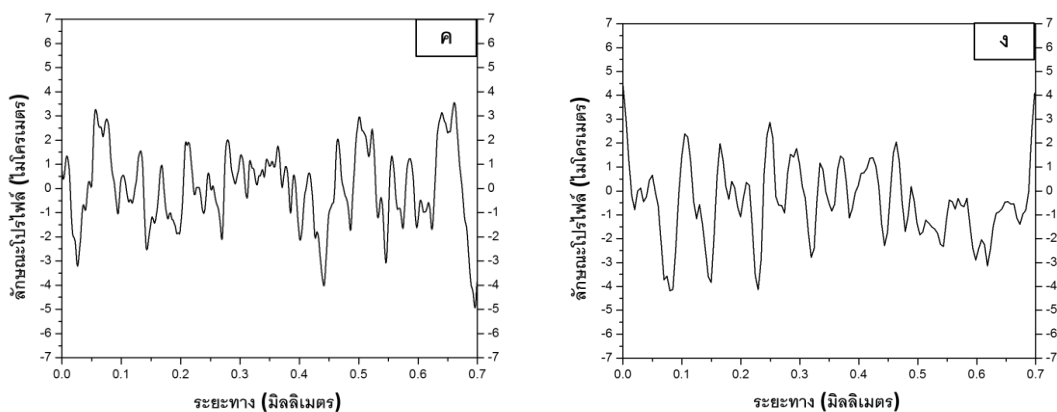
ความตรงของล้อยเจียรไนค่อนข้างตรงเหตุผลเดียวกับหัวข้อ 4.4.1 และเมื่อคำนวณค่าความสูง-ต่ำของล้อยเจียรไนเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ยพบว่าล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนสิบห้าครั้งมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 1.075 ไมโครเมตร

#### 4.4.4 ล้อยเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (15 & dress)

ภาพที่ 4.16 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนหลังการลับคมต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้นพบว่าลักษณะของล้อยเจียรไนค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดระยะทางที่วัด ความสูง-ต่ำของล้อยเจียรไนมีค่าอยู่ระหว่าง -5 ถึง 4 ระยะห่างระหว่างวัลเลย์ถึงวัลเลย์มีค่าน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างวัลเลย์ถึงวัลเลย์ของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น



ภาพที่ 4.16 ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยเจียรไนที่หลังการลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น เป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร  
ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง และ ข) ตำแหน่งที่สอง

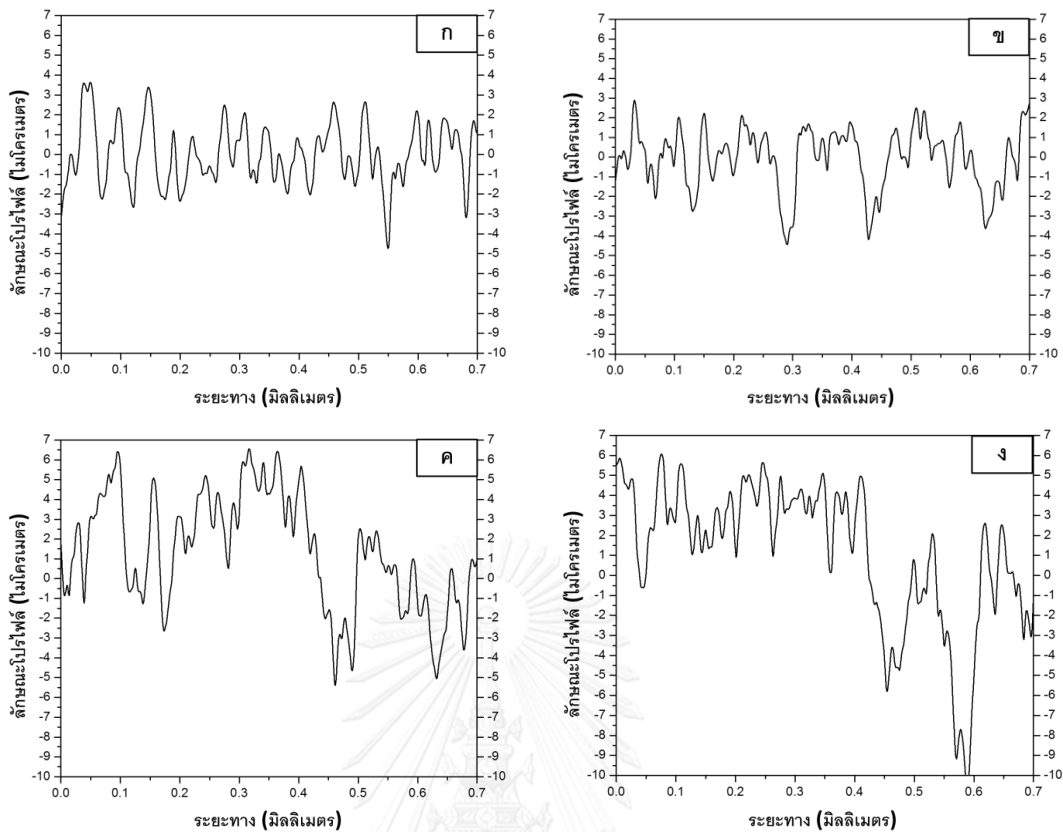


**ภาพที่ 4.16** ลักษณะโปรไฟล์ของลวดเจียรไนที่หลังการลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น เป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร (ต่อ)  
 ค) ตำแหน่งที่สาม และ ง) ตำแหน่งที่สี่

ความตรงของลวดเจียรไนยังคงตรงสม่ำเสมอตลอดระยะทางที่วัดเหตุผลเดียวกับหัวข้อ 4.4.1 และเมื่อนำค่าความสูง-ต่ำของผิวลวดเจียรไนไปคำนวณเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ยพบว่าที่สภาวะหลังการลับคมต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 1.047 ไมโครเมตร

#### 4.4.5 ลวดเจียรไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (30 passes)

ลักษณะโปรไฟล์ของลวดเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นแสดงดังภาพที่ 4.17 พบว่าความสูง-ต่ำมีค่าอยู่ระหว่าง -10 ถึง 6.5 ไมโครเมตร และค่อนข้างสม่ำเสมอในตำแหน่งที่หนึ่งและตำแหน่งที่สอง (ภาพที่ 4.17 ก) และ ข) ตามลำดับ) ตลอดระยะทางที่ทำการวัด แต่ในตำแหน่งที่สามและตำแหน่งที่สี่ (ภาพที่ 4.17 ค) และ ง) ตามลำดับ) พบว่าค่าสูงต่ำของลวดเจียรไนนั้นไม่สม่ำเสมอ โดยก่อนจากระยะที่ทำการตรวจสอบ 0.4 มิลลิเมตร ความสูง-ต่ำของพื้นผิวจะมีค่าค่อนข้างไปทางค่าทาง และหลังระยะที่ทำการตรวจสอบ 0.4 มิลลิเมตร ความสูง-ต่ำของพื้นผิวมีค่าค่อนข้างไปทางติดลบ



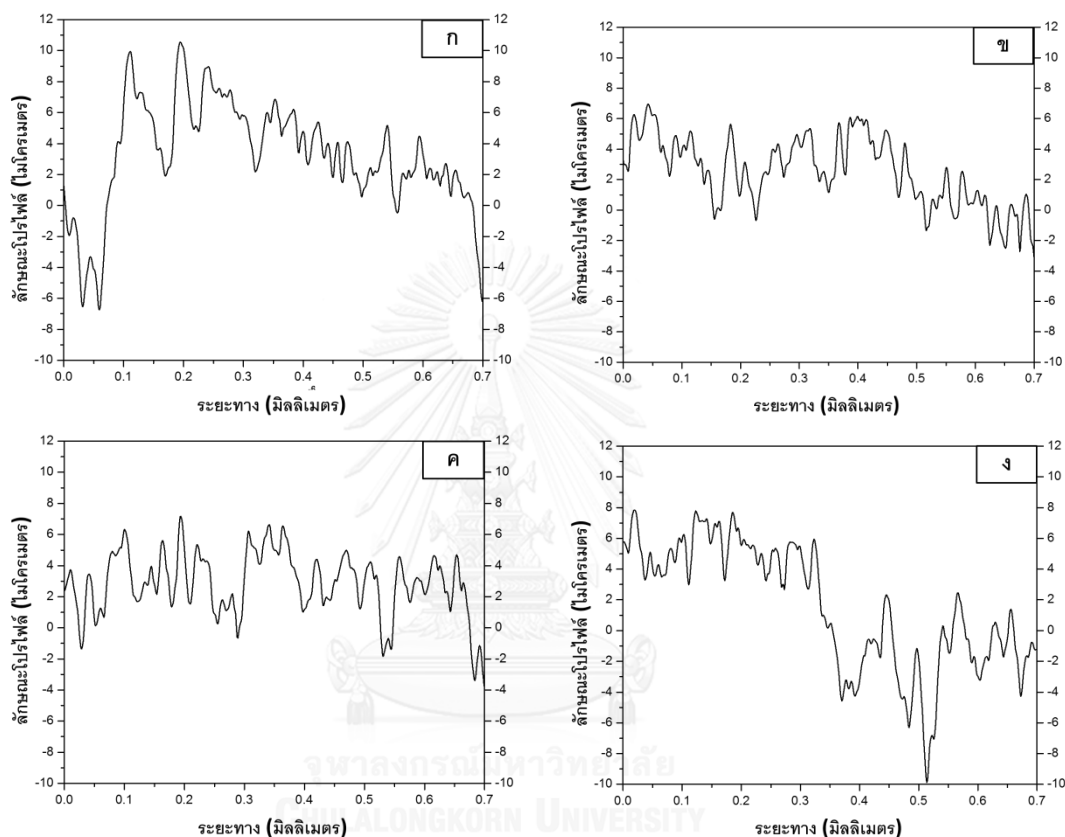
ภาพที่ 4.17 ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยีระไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง, ข) ตำแหน่งที่สอง, ค) ตำแหน่งที่สาม และ ง) ตำแหน่งที่สี่

ที่สภาวะนี้ล้อยีระไนสูญเสียความตรงไปแล้ว เนื่องจากความสูงของพีกเทียบกับค่าศูนย์ และความต่ำของวัลเลย์เทียบกับค่าศูนย์ไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำค่าความสูง-ต่ำมาคำนวณเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ยพบว่าล้อยีระไนมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 1.122 ไมโครเมตร ที่สภาวะหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น

#### 4.4.6 ล้อยีระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (30 & dress)

ภาพที่ 4.18 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของล้อยีระไนหลังลับคมต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นพบว่าความสูง-ต่ำของล้อยีระไนไม่สม่ำเสมออย่างเห็นได้ชัด สังเกตได้จากที่ระยะ 0.6 มิลลิเมตร ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยีระไนมีค่าต่ำลงโดยมีค่าความสูง-ต่ำอยู่ในช่วงระหว่าง -10 ถึง 10 ไมโครเมตร ระยะห่างระหว่างวัลเลย์ถึงวัลเลย์ค่อนข้างมีความหลากหลาย กล่าวคือ บางบริเวณมีค่าน้อย บางบริเวณมีค่ามาก

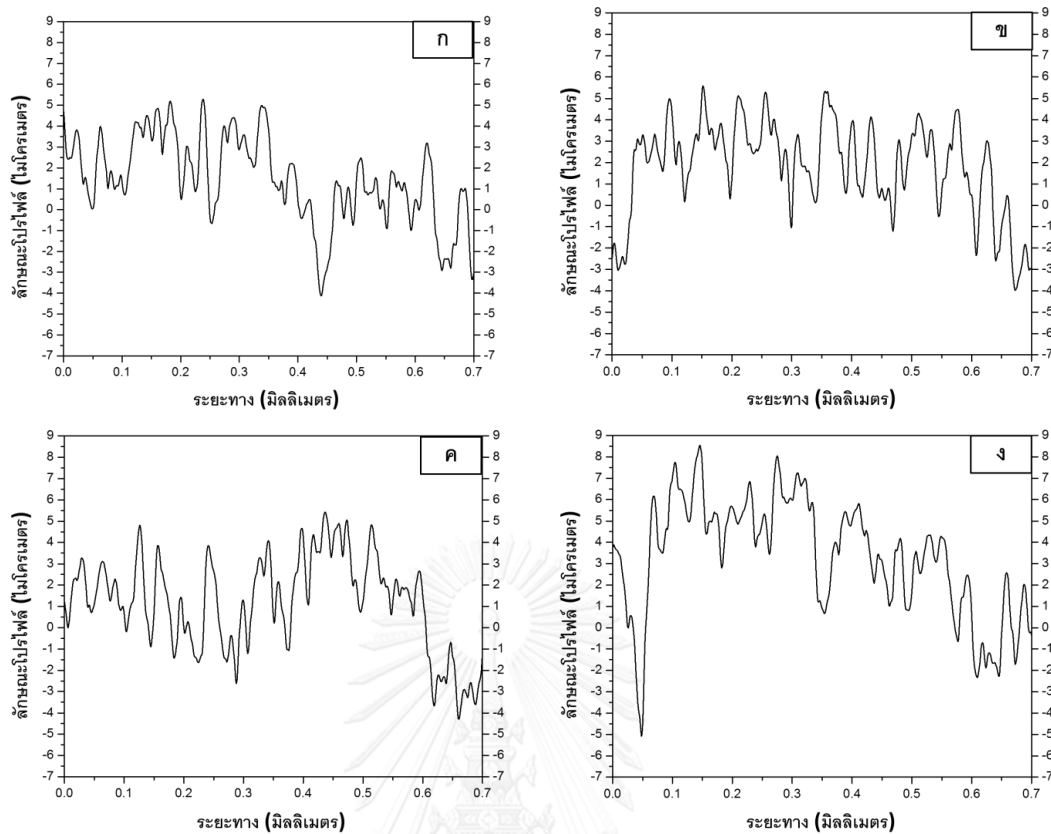
ระยะทางที่ทำการวัดที่ 0 ถึง 0.6 มิลลิเมตร ความสูงของพีคมีค่าอยู่เหนือค่าศูนย์ แต่หลังจาก ระยะทาง 0.6 มิลลิเมตรความสูงของพีคมีค่าอยู่ใต้ค่าศูนย์ ซึ่งบ่งบอกถึงความตรงของล้อเจียร์ไนที่ สูญเสียไป และเมื่อนำค่าความสูง-ต่ำมาคำนวณเป็นค่าความหยาบผิวเฉลี่ยพบว่าค่าความหยาบผิว เฉลี่ยของล้อเจียร์ไนที่สภาวะหลังการลับคมต่อจากการใช้เจียร์ไนสามสิบครั้งมีค่าเท่ากับ 1.122 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.18 ลักษณะโปรไฟล์ของล้อเจียร์ไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง, ข) ตำแหน่งที่สอง, ค) ตำแหน่งที่สาม และ ง) ตำแหน่งที่สี่

#### 4.4.7 ล้อเจียร์ไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น (45 passes)

ภาพที่ 4.19 แสดงลักษณะโปรไฟล์ของล้อเจียร์ไนหลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น การเสียความตรงของล้อเจียร์ไนยังคงอยู่และเกิดต่อเนื่องมาจากสภาวะก่อนหน้า (30 & dress) ค่าความสูง-ต่ำของล้อเจียร์ไนมีค่าอยู่ระหว่าง -5 ถึง 5 ไมโครเมตร

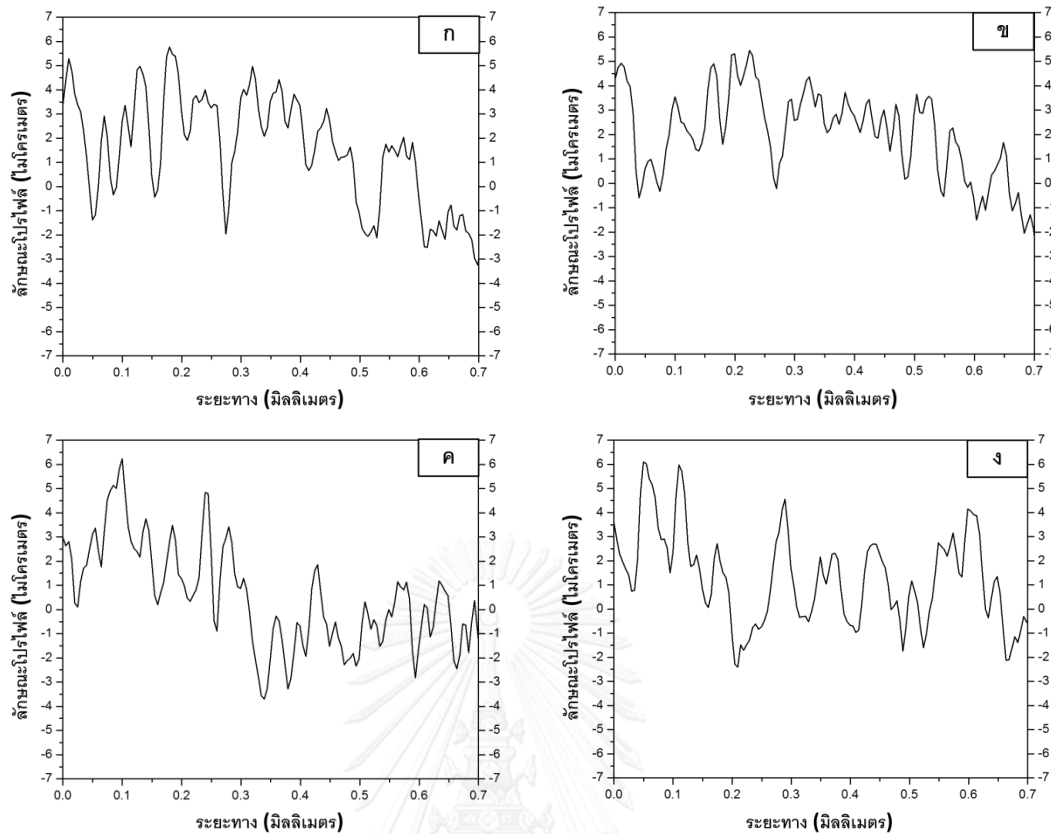


ภาพที่ 4.19 ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยีระไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง, ข) ตำแหน่งที่สอง, ค) ตำแหน่งที่สาม และ ง) ตำแหน่งที่สี่

จากที่ได้กล่าวถึงความตรงของล้อยีระไนดังหัวข้อที่ 4.4.6 ที่สภาวะนี้ก็เกิดขึ้นในทำนองเดียวกันคือที่ระยะ 0.5 มิลลิเมตรเป็นต้นไป ความสูงของพีคมีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 4 ไมโครเมตร แต่ก่อน 0.5 มิลลิเมตรอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 ไมโครเมตร เมื่อนำค่าความสูง-ต่ำไปคำนวณหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยพบว่าที่สภาวะนี้ล้อยีระไนมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 1.074 ไมโครเมตร

#### 4.4.8 ล้อยีระไนแบบเพชรที่มีตัวประสานเป็นเนื้อแก้วหลังการลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น (45 & dress)

ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยีระไนหลังการลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น แสดงดังภาพที่ 4.20 พบว่าค่าความสูง-ต่ำมีค่าอยู่ระหว่าง -3.6 ถึง 6.2 ไมโครเมตร การสูญเสียความตรงยังคงเกิดขึ้นที่สภาวะนี้ต่อเนื่องจากสภาวะ 30 & dress โดยเริ่มเกิดที่ระยะประมาณ 0.5 มิลลิเมตรของการวัด ระยะห่างระหว่างวัลเลย์ถึงวัลเลย์ค่อนข้างคงที่ตลอดระยะทางที่ทำการวัด เมื่อคำนวณหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยพบว่าที่สภาวะหลังการลับคมต่อจากการใช้เจียรไนสี่สีห้าครั้งมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 0.824 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.20 ลักษณะโปรไฟล์ของล้อยีวระไนที่หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรระไนอะลูมิเนียมไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชิ้นเป็นระยะทาง 0.7 มิลลิเมตร ก) ตำแหน่งที่หนึ่ง, ข) ตำแหน่งที่สอง ค) ตำแหน่งที่สาม และ ง) ตำแหน่งที่สี่

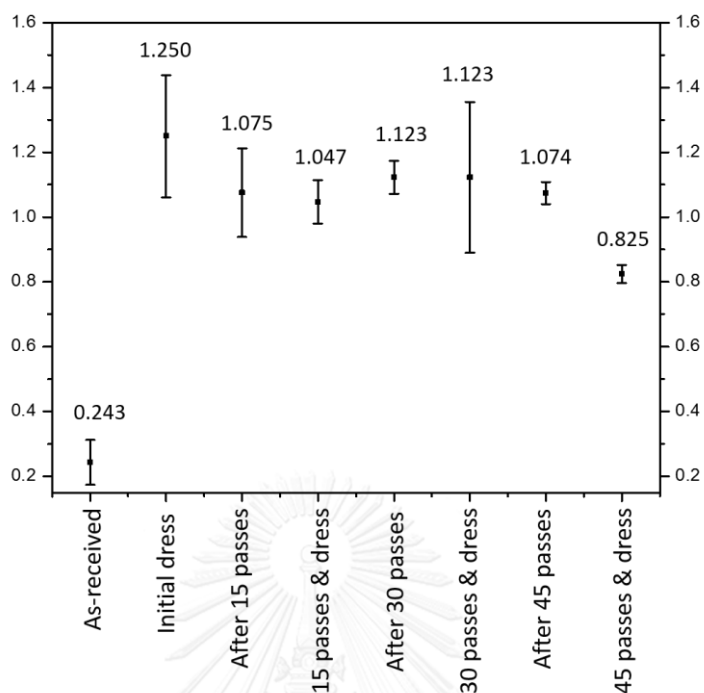
#### 4.4.9 เปรียบเทียบความหยาบผิวของล้อยีวระไนที่สภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหยาบผิวของล้อยีวระไนที่สภาวะต่าง ๆ ทั้งสี่ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งได้ทำการวัดสามครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ย และนำค่าความหยาบผิวของแต่ละตำแหน่งมาหาค่าเฉลี่ยเป็นตัวแทนค่าความหยาบผิวของล้อยีวระไนที่สภาวะต่าง ๆ อีกครั้ง ซึ่งแสดงดังคอลัมน์ที่ห้าของตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของล้อเจียรไนที่สภาวะต่าง ๆ ทั้งสี่ตำแหน่ง

| สภาวะ             | ความหยาบผิว (ไมโครเมตร) |               |               |               | ความหยาบผิวเฉลี่ย (ไมโครเมตร) | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------------|---------------------|
|                   | ตำแหน่งที่หนึ่ง         | ตำแหน่งที่สอง | ตำแหน่งที่สาม | ตำแหน่งที่สี่ |                               |                     |
| As-received       | 0.164                   | 0.239         | 0.236         | 0.333         | 0.243                         | 0.069               |
| Initial dress     | 1.377                   | 0.973         | 1.290         | 1.360         | 1.250                         | 0.189               |
| After 15 passes   | 0.992                   | 1.160         | 1.220         | 0.930         | 1.075                         | 0.137               |
| 15 passes & dress | 1.128                   | 1.062         | 0.968         | 1.028         | 1.047                         | 0.067               |
| After 30 passes   | 1.144                   | 1.047         | 1.142         | 1.157         | 1.123                         | 0.051               |
| 30 passes & dress | 0.857                   | 1.040         | 1.181         | 1.410         | 1.123                         | 0.233               |
| After 45 passes   | 1.044                   | 1.123         | 1.066         | 1.063         | 1.074                         | 0.034               |
| 45 passes & dress | 0.813                   | 0.817         | 0.802         | 0.865         | 0.825                         | 0.028               |

เมื่อนำตัวแทนค่าความหยาบผิวของล้อเจียรไนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่สภาวะต่าง ๆ ไปพลอตเป็นกราฟโดยแกนเอกซ์แสดงล้อเจียรไนที่สภาวะต่าง ๆ ส่วนแกนวายแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยดังแสดงดังภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.21 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของล้อเจียรไนที่สภาวะต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของล้อเจียรไนที่ได้รับมา (as-received) นั้นมีค่าเท่ากับ 0.243 ไมโครเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.0693 ซึ่งหากตีความตัวเลขเป็นความหมายกายภาพจะสามารถอนุมานได้ว่าล้อเจียรไนที่ได้รับมานั้นมีผิวเรียบ (ความสูงของอนุภาคขดสีโพลีเอสเตอร์บริเวณข้างๆ ไม่มากนัก) และค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวหน้าของล้อเจียรไน

เมื่อนำล้อเจียรไนไปลับคมครั้งแรก (initial dress) พบว่าค่าความหยาบผิวมีค่าเท่ากับ 1.250 ไมโครเมตร ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.189 จะเห็นว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยหลังการลับคมครั้งแรกนั้นมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมาก ในทำนองเดียวกับที่สภาวะ as-received สามารถอนุมานได้ว่าล้อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรกนั้นเป็นการกำจัดตัวประสานรอบอนุภาคขดสีโพลีเอสเตอร์บริเวณข้างๆ มากขึ้น และหลังจากใช้งานล้อเจียรไนหลังจากลับคมครั้งแรกนั้น ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะกล่าวอีกครั้งในหัวข้ออภิปรายผลการทดลอง



#### 4.5 ความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

หลังจากที่เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จะนำไปวัดความหยาบผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมโดยทำการวัด 3 ตำแหน่งต่อชั้น ยกเว้นการเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น (45 passes) เนื่องจากไม่สามารถตรวจสอบความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในปริมาณที่มากได้ จึงสามารถความหยาบผิวได้แค่ 1 ตำแหน่ง

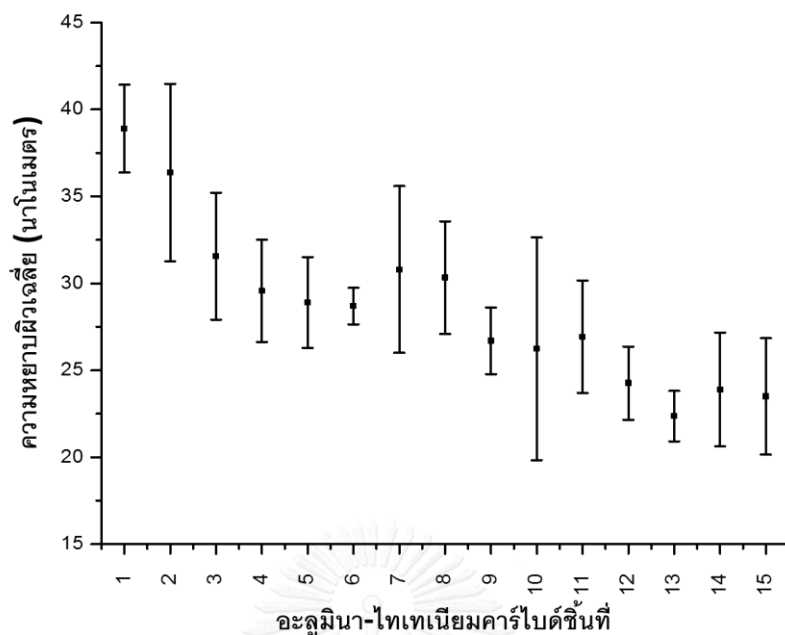
##### 4.5.1 ความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังถูกเจียรระโนด้วยล้อเจียรระโนหลังลับคมครั้งแรก 15 ชั้น

หลังจากลับคมล้อเจียรระโนครั้งแรก (initial dress) ก็นำล้อเจียรระโนดังกล่าวไปทำการเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จำนวนทั้งสิ้น 15 ชั้น และนำอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้ง 15 ชั้นไปวัดความหยาบผิวด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) สามตำแหน่งต่อชิ้นงานและนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนความหยาบผิวของแต่ละชั้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังถูกเจียรระโนด้วยล้อเจียรระโนหลังลับคมครั้งแรก

| ชั้นที่                      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 38.9 | 36.3 | 31.5 | 29.5 | 28.9 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน          | 2.5  | 5.1  | 3.6  | 2.9  | 2.6  |
| ชั้นที่                      | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 28.7 | 30.8 | 30.3 | 26.7 | 26.2 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน          | 1.0  | 4.7  | 3.2  | 1.9  | 6.4  |
| ชั้นที่                      | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 26.9 | 24.2 | 22.3 | 23.9 | 23.5 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน          | 3.2  | 2.1  | 1.4  | 3.2  | 3.3  |

เมื่อนำค่าความหยาบผิวเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไปพลอตกราฟ โดยแกนเอกซ์แสดงอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นที่ ส่วนแกนวายแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ย ดังภาพที่ 4.22 พบว่าอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นแรกมีความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 38.9 นาโนเมตร และชั้นสุดท้าย (ชั้นที่ 15) มีความหยาบผิวเฉลี่ยเท่ากับ 23.5 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจะเห็นว่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงจากชั้นแรกถึงชั้นสุดท้าย จะมีอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์บางชั้นที่ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่มีแนวโน้มต่างออกไป กล่าวคือชั้นที่เจ็ด, สิบเอ็ด, และชั้นที่สิบสี่ ซึ่งมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจากค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของชั้นก่อนหน้า



ภาพที่ 4.22 ค่าความหนาของผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น

#### 4.5.2 ความหนาของผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังการลับคมแบบปกติ 30 ชั้น

ในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.5.1 เมื่อนำล้อเจียรไนไปลับคมแบบปกติหลังจากใช้เจียรไน ชั้นงานอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น ก็นำล้อเจียรไนมาเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ต่อเป็นจำนวนทั้งสิ้น 30 ชั้น หลังจากนั้นนำชิ้นงานทั้งหมดไปวัดความหนาของผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ แรงอะตอม โดยวัดสามตำแหน่งในแต่ละชั้นและนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ค่าความหนาของผิวเฉลี่ยดัง ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนาของผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยล้อเจียรไนหลังการลับคม

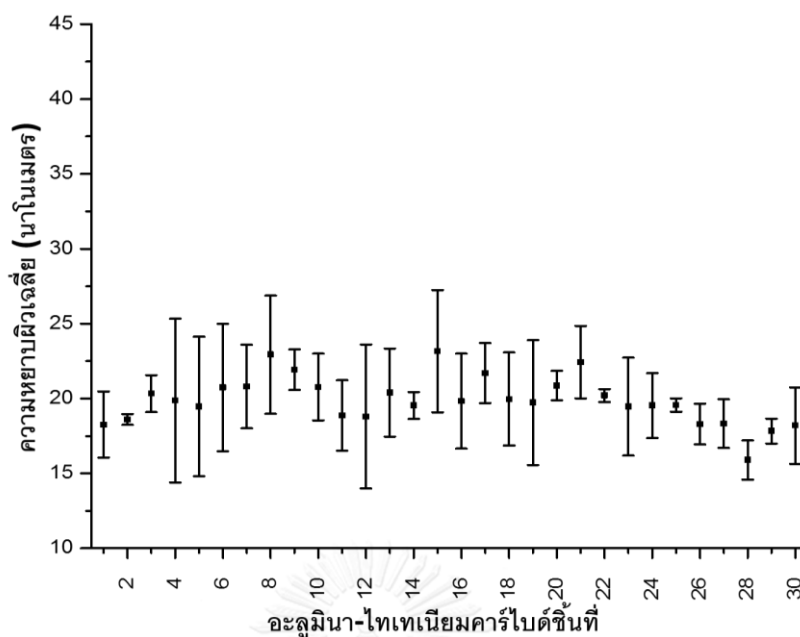
| ชั้นที่                        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| ความหนาของผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 18.2 | 18.6 | 20.3 | 19.8 | 19.4 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน            | 2.2  | 0.3  | 1.2  | 5.4  | 4.6  |
| ชั้นที่                        | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| ความหนาของผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 20.7 | 20.8 | 22.9 | 21.9 | 20.7 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน            | 4.2  | 2.8  | 3.9  | 1.3  | 2.2  |

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยล้อเจียรระไนหลังการลับคม (ต่อ)

|                              |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| ชั้นที่                      | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 18.8 | 18.8 | 20.4 | 19.5 | 23.1 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน          | 2.3  | 4.8  | 2.9  | 0.8  | 4.0  |
| ชั้นที่                      | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 19.8 | 21.7 | 19.9 | 19.7 | 20.8 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน          | 3.1  | 2.0  | 3.1  | 4.1  | 0.9  |
| ชั้นที่                      | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 22.4 | 20.2 | 19.4 | 19.5 | 19.5 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน          | 2.4  | 0.4  | 3.2  | 2.1  | 0.4  |
| ชั้นที่                      | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 18.3 | 18.3 | 15.9 | 17.8 | 18.2 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน          | 1.3  | 1.6  | 1.3  | 0.8  | 2.5  |

เมื่อนำข้อมูลในตารางมาพลอตเป็นกราฟแสดงดังภาพที่ 4.23 โดยแกนเอกซ์แสดงอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นที่ ส่วนแกนวายแสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ พบว่าค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ทั้งสามสิบชั้นมีค่าไม่ต่างกันมากนักโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 15.9 ถึง 23.1 นาโนเมตร

สังเกตได้ว่าค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นแรก (18.2 นาโนเมตร) มีค่าแตกต่างกันมากกับค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นแรก (38.9 นาโนเมตร) ที่ถูกเจียรระไนด้วยล้อเจียรระไนที่ผ่านการลับคมครั้งแรก ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวอาจจะเกิดกระบวนการลับคมที่แตกต่างกันซึ่งจะกล่าวในหัวข้ออภิปรายผลการทดลอง



ภาพที่ 4.23 ค่าความหนาแน่นผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น

#### 4.5.3 ความหนาแน่นผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังถูกเจียรระโนด้วยเจียรระโนหลังการลับคมแบบปกติ 45 ชั้น

ในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.5.1 และ 4.5.2 อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นถูกเจียรระโนหลังจากนำล้อเจียรระโนไปลับคม ได้ค่าความหนาแน่นผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ดังแสดงในตารางที่ 4.5 เนื่องจากการทดลองในครั้งนี้ขึ้นงานอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ทำการวัดมีจำนวนมาก (45 ชั้น) จึงวัดค่าความหนาแน่นผิวแค่ตำแหน่งเดียวต่อหนึ่งชั้น

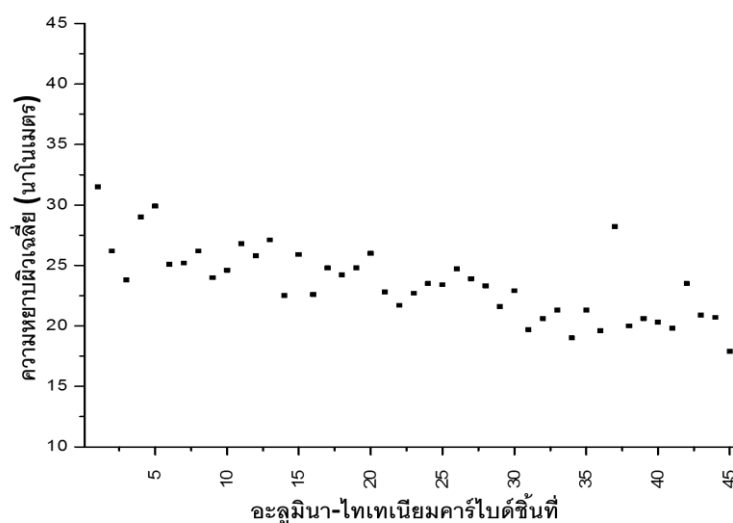
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความหนาแน่นผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยล้อเจียรระโนหลังการลับคม

| ชั้นที่                         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|
| ความหนาแน่นผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 31.5 | 26.2 | 23.8 | 29   | 29.9 |
| ชั้นที่                         | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| ความหนาแน่นผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 25.1 | 25.2 | 26.2 | 24   | 24.6 |
| ชั้นที่                         | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   |
| ความหนาแน่นผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 26.8 | 25.8 | 27.1 | 22.5 | 25.9 |
| ชั้นที่                         | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   |
| ความหนาแน่นผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 22.6 | 24.8 | 24.2 | 24.8 | 26   |

**ตารางที่ 4.5** แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยล้อเจียรไนหลังการลับคม (ต่อ)

|                              |      |      |      |      |      |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| ชั้นที่                      | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 22.8 | 21.7 | 22.7 | 23.5 | 23.4 |
| ชั้นที่                      | 26   | 27   | 28   | 29   | 30   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 24.7 | 23.9 | 23.3 | 21.6 | 22.9 |
| ชั้นที่                      | 31   | 32   | 33   | 34   | 35   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 19.7 | 20.6 | 21.3 | 19   | 21.3 |
| ชั้นที่                      | 36   | 37   | 38   | 39   | 40   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 19.6 | 28.2 | 20   | 20.6 | 20.3 |
| ชั้นที่                      | 41   | 42   | 43   | 44   | 45   |
| ความหยาบผิวเฉลี่ย (นาโนเมตร) | 19.8 | 23.5 | 20.9 | 20.7 | 17.9 |

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 4.5 มาพลอตเป็นกราฟดังแสดงในภาพที่ 4.24 แกนเอกซ์แสดงอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นที่ แกนวายแสดงความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ โดยความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นแรกมีค่าความหยาบเท่ากับ 31.5 นาโนเมตร และชั้นที่สี่สิบห้าเท่ากับ 17.9 นาโนเมตร ผลการทดลองครั้งนี้ให้ผลคล้ายกับการทดลองที่ใช้ล้อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรกเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ กล่าวคือค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์มีแนวโน้มลดลงจากชั้นแรกถึงชั้นสุดท้าย ถึงแม้ว่าค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นแรกจะมีค่าค่อนข้างแตกต่างกัน (38.9 และ 31.5 นาโนเมตร)



**ภาพที่ 4.24** ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น

## 4.6 กระแสของมอเตอร์

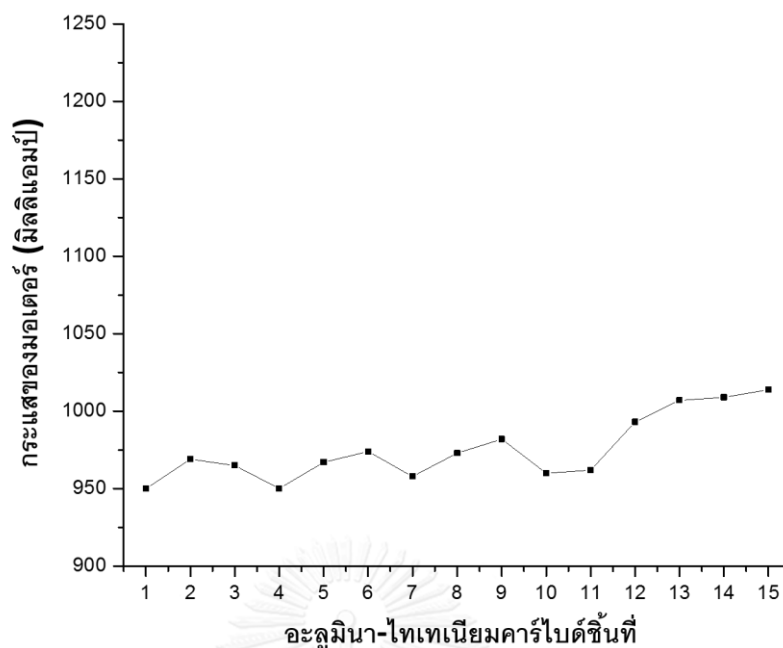
### 4.6.1 กระแสของมอเตอร์ขณะเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น

นำล้อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรกมาเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จำนวน 15 ชั้น ขณะเจียรไนเครื่องเจียรไนจะทำการเก็บข้อมูลกระแสของมอเตอร์เพื่อที่จะป้อนกระแสให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ด้วยอัตราเร็ว 10,000 รอบต่อนาที โดยจะทำการเก็บข้อมูลกระแสของมอเตอร์ตลอดการเจียรไนชิ้นงานในแต่ละชั้น จากนั้นนำกระแสของมอเตอร์ที่ได้มาพลอตกราฟหาพื้นที่ใต้กราฟและหารด้วยเวลาที่ใช้เจียรไน ได้ข้อมูลเป็นค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนชิ้นงานต่อชิ้นดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชิ้น

| ชั้นที่                      | 1   | 2   | 3     | 4     | 5     |
|------------------------------|-----|-----|-------|-------|-------|
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 950 | 969 | 965   | 950   | 967   |
| ชั้นที่                      | 6   | 7   | 8     | 9     | 10    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 974 | 958 | 973   | 982   | 960   |
| ชั้นที่                      | 11  | 12  | 13    | 14    | 15    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 962 | 993 | 1,007 | 1,009 | 1,014 |

เมื่อนำค่าในตารางที่ 4.6 มาพลอตเป็นกราฟดังแสดงในภาพที่ 4.25 แกนเอกซ์แสดงอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นที่ แกนวายแสดงค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ย พบว่ากระแสของมอเตอร์ที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นแรกมีค่าเท่ากับ 950 มิลลิแอมป์ และ 1,014 มิลลิแอมป์ สำหรับชั้นที่สิบห้า สังเกตได้ว่ากระแสของมอเตอร์ที่ใช้เจียรไนมีค่าขึ้นลงตลอดสิบห้าชั้น แต่ถ้าหากดูแนวโน้มก็สามารถบอกได้ว่ากระแสของมอเตอร์ต้องใช้เวลาเจียรไนชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 4.25 ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อขั้น

#### 4.6.2 กระแสของมอเตอร์ขณะเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 องศา

ในทำนองเดียวกับหัวข้อ 4.6.1 เมื่อทำการทดลองเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยล้อเจียรไนหลังการลับคมจำนวนสามสิบขั้นพบว่าให้ผลดังตารางที่ 4.7 และเมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.7 มาพลอตเป็นกราฟดังภาพที่ 4.26 แกนเอกซ์แสดงอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ขั้นที่ แกนวายแสดงค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ย

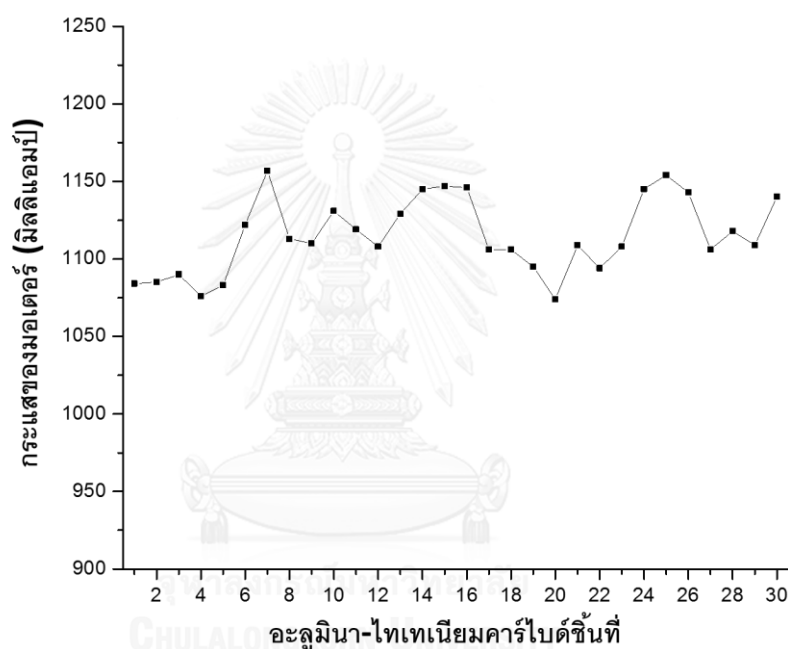
ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อขั้น

| ขั้นที่                      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,084 | 1,085 | 1,090 | 1,076 | 1,083 |
| ขั้นที่                      | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,122 | 1,157 | 1,113 | 1,110 | 1,131 |
| ขั้นที่                      | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,119 | 1,108 | 1,129 | 1,145 | 1,147 |
| ขั้นที่                      | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,146 | 1,106 | 1,106 | 1,095 | 1,074 |

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชิ้น (ต่อ)

|                              |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ชิ้นที่                      | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,109 | 1,094 | 1,108 | 1,145 | 1,154 |
| ชิ้นที่                      | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,143 | 1,106 | 1,118 | 1,109 | 1,140 |

จากภาพที่ 4.26 พบว่าค่ากระแสของมอเตอร์ที่ใช้เจียรระโนมีค่าในช่วง 1,076 ถึง 1,157 ค่ากระแสของมอเตอร์มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแต่ไม่ชัดเจนเท่ากับการทดลองในหัวข้อที่ 4.6.1 (เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชิ้น)



ภาพที่ 4.26 ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชิ้น

#### 4.6.3 กระแสของมอเตอร์ขณะเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชิ้น

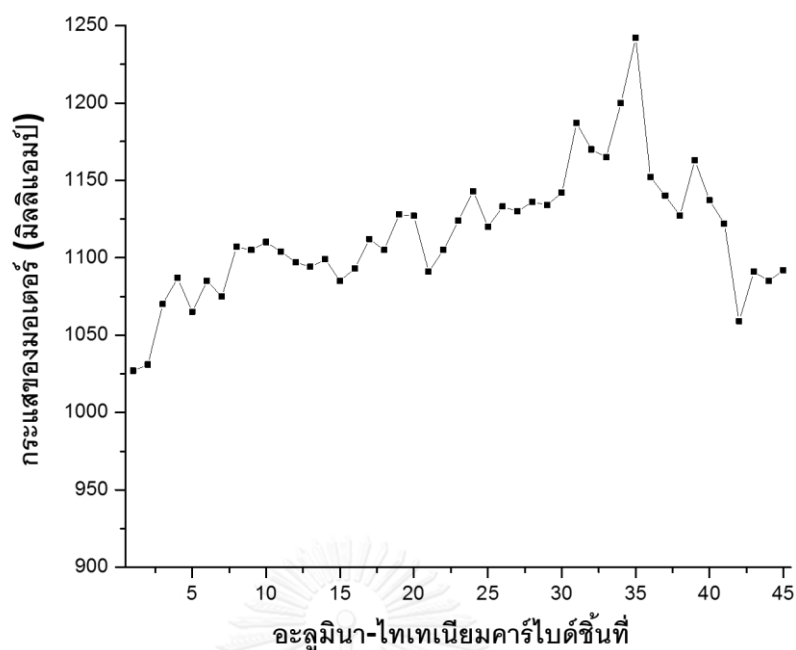
การทดลองและการเก็บข้อมูลเหมือนในหัวข้อที่ 4.6.2 เพียงแต่ครั้งนี้ทำการเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จำนวนสี่สิบห้าชิ้น พบว่ามีค่ากระแสของมอเตอร์ดังตารางที่ 4.8 แสดงค่ากระแสของมอเตอร์ที่ใช้เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์แต่ละชิ้น และเมื่อนำค่ากระแสของมอเตอร์ในตารางที่ 4.8 ไปพลอตเป็นกราฟแสดงดังภาพที่ 4.27 โดยแกนเอกซ์แสดงอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชิ้นที่ และแกนวายแสดงค่ากระแสของมอเตอร์



ตารางที่ 4.8 ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อชั้น

|                              |       |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ชั้นที่                      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,027 | 1,031 | 1,070 | 1,087 | 1,065 |
| ชั้นที่                      | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,085 | 1,075 | 1,107 | 1,105 | 1,110 |
| ชั้นที่                      | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,104 | 1,097 | 1,094 | 1,099 | 1,085 |
| ชั้นที่                      | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,093 | 1,112 | 1,105 | 1,128 | 1,127 |
| ชั้นที่                      | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,091 | 1,105 | 1,124 | 1,143 | 1,120 |
| ชั้นที่                      | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,133 | 1,130 | 1,136 | 1,134 | 1,142 |
| ชั้นที่                      | 31    | 32    | 33    | 34    | 35    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,187 | 1,170 | 1,165 | 1,200 | 1,242 |
| ชั้นที่                      | 36    | 37    | 38    | 39    | 40    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,152 | 1,140 | 1,127 | 1,163 | 1,137 |
| ชั้นที่                      | 41    | 42    | 43    | 44    | 45    |
| กระแสของมอเตอร์ (มิลลิแอมป์) | 1,122 | 1,059 | 1,091 | 1,086 | 1,094 |

จากกราฟพบว่า ค่ากระแสของมอเตอร์ที่ต้องใช้เจียระไนต่อชั้นมีแนวโน้มสูงขึ้นจากอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นแรกจนถึงชั้นที่สามสิบห้า ซึ่งมีค่าสูงถึง 1,242 มิลลิแอมป์ หลังจากอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นที่ 35 ค่ากระแสของมอเตอร์ที่ต้องใช้มีแนวโน้มลดลง จนถึงชั้นที่ 42 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งในชั้นที่ 43



ภาพที่ 4.27 ค่ากระแสของมอเตอร์เฉลี่ยที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อขึ้น

เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อกระแสของมอเตอร์ลดลงหลังเพิ่มทั้ง ๆ ที่ก่อนหน้านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เกิดจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการลับคมในตัวเอง (self-sharpening) คือการที่ล้อเจียรไนสามารถสร้างคมใหม่ (อนุภาคขัดสีมีเหลี่ยมคมมากขึ้น) เพื่อใช้เจียรไนต่อไป

#### 4.7 อภิปรายผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอภิปรายผลการทดลองโดยอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นโดยแบ่งการอภิปรายออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่

1. สิ่งที่เกิดขึ้นกับล้อเจียรไน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไน, ผลของการลับคมต่อสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไน โดยนำผลการทดลอง ซึ่งได้แก่ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, ลักษณะโปรไฟล์ที่วัดจากเครื่องวัดความหยาบผิว และความหยาบผิวของล้อเจียรไนที่คำนวณจากลักษณะโปรไฟล์ มาจำลองเป็นภาพวาดสิ่งที่เกิดขึ้นเพื่อให้เข้าใจได้ง่าย

2. สิ่งที่เกิดขึ้นกับอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ถูกเจียรไน ได้แก่ ความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยจะอภิปรายผลที่เกิดขึ้นซึ่งสอดคล้องกับกระแสของมอเตอร์ขณะเจียรไนและสิ่งที่เกิดขึ้นกับล้อเจียรไน ดังนี้

#### 4.7.1 การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของล่อเจียรไน

การพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของล่อเจียรไนจะพิจารณาผลจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของล่อเจียรไนทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการกัดกรดด้วยดิวครดกัดแก้ว, ลักษณะโปรไฟล์ และความหยาบผิว ได้ดังนี้

##### 4.7.1.1 ล่อเจียรไนที่ได้รับมา

จากผลการตรวจสอบล่อเจียรไนที่ได้รับมาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า ล่อเจียรไนที่ได้รับมามีปริมาณรูพรุนที่เยอะมากเมื่อเทียบกับล่อเจียรไนที่สภาวะอื่น อีกทั้งสามารถสังเกตได้ว่าปริมาณตัวประสานที่ปกคลุมอนุภาคขี้ดสีนั้นมีเยอะมาก แต่เมื่อนำไปวัดความหยาบผิวพบว่ามีความหยาบผิวเฉลี่ยเพียง 0.243 ไมโครเมตร และจากลักษณะโปรไฟล์ของล่อเจียรไนที่พบนั้นพบว่าผิวของล่อเจียรไนที่ได้รับมามีค่าความหยาบผิวเรียบ จึงสามารถจำลองลักษณะผิวของล่อเจียรไนได้ดังภาพที่ 4.28



ภาพที่ 4.28 ภาพจำลองภาพตัดขวางของล่อเจียรไนที่ได้รับมา

ถึงแม้ว่าภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะเห็นปริมาณรูพรุนที่เยอะบนผิวของล่อเจียรไน แต่กลับมีค่าความหยาบผิวที่ต่ำนั้นสาเหตุมาจากรูพรุนที่อยู่บนผิวล่อเจียรไนนั้นเมื่อดูจากหลายๆ บริเวณจะพบว่ารูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก และอยู่กึ่งกลางของผิวล่อเจียรไนอีกที เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะโปรไฟล์ และความหยาบผิวด้วยเครื่องโปรไฟล์มิเตอร์ที่มีหัวเข็มค่อนข้างใหญ่ อีกทั้งความเร็วในการลากหัวเข็มขณะตรวจสอบที่เร็ว (1,500  $\mu\text{m/s}$ ) จึงทำให้ขณะตรวจสอบหัวเข็มได้ลากผ่านบริเวณที่เป็นรูพรุนไป จึงทำให้ลักษณะโปรไฟล์และความหยาบผิวของล่อเจียรไนที่ได้รับมาเป็นไปตามผลการทดลองข้างต้น

##### 4.7.1.2 ล่อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรก

หลังการลับคมครั้งแรกสิ่งที่สังเกตได้ชัดเจนคือปริมาณรูพรุนใต้ผิวของล่อเจียรไนที่ลดลง รูพรุนดูตื้นขึ้น และยังคงเห็นตัวประสานที่ปกคลุมอนุภาคขี้ดสีเช่นเดิมคล้ายกับล่อเจียรไนที่ได้รับมา ล่อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรกนั้นเรียบขึ้น แต่ลักษณะโปรไฟล์ และความหยาบผิวนั้นมีผลตรงกันข้าม กล่าวคือ ลักษณะโปรไฟล์มีความสูง-ต่ำของพีคที่สูงสม่ำเสมอ และมีค่าความหยาบผิว 1.250 ไมโครเมตร ซึ่งสามารถจำลองได้ดังภาพที่ 4.29



ภาพที่ 4.29 ภาพจำลองภาพตัดขวางของล่อเจียระไนหลังลับคมครั้งแรก

สิ่งที่คาดว่าเกิดขึ้นกับล่อเจียระไนหลังลับคมครั้งแรกคือ ตัวประสานที่ปกคลุมเหนืออนุภาคซัดสีที่เป็นส่วนเกินและอยู่เหนือรูพรุนถูกกำจัดออกไป เหลือแค่ตัวประสานบางๆ ที่ปกคลุมอนุภาคซัดสีดังภาพที่ 4.29 จึงทำให้ลักษณะโปรไฟล์และความหยาบผิวเป็นไปตามหัวข้อที่ 4.4.2

เมื่อคุณลักษณะของอนุภาคซัดสีบนล่อเจียระไนหลังการลับคมครั้งแรกที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า แม้ว่าที่กำลังขยายไม่สูงมากนัก (1,000 และ 2,000 เท่า) จะเห็นว่าอนุภาคซัดสีนั้นเกิดความเสียหายแบบเสียม แต่เมื่อตรวจสอบที่กำลังขยายสูงนั้นพบว่าอนุภาคซัดสีที่อยู่บนล่อเจียระไนหลังลับคมครั้งแรกไม่เกิดความเสียหายเลย หรือเกิดความเสียหายน้อยมาก สาเหตุที่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวเนื่องจากความแข็งของอนุภาคซัดสีซึ่งเป็นเพชรนั้นมี ความแข็ง (7,000-12,000 HV [12]) มากกว่าหินลับคม (อะลูมินาบริสุทธิ์ 1,400 HV [12]) ทำให้อนุภาคซัดสีเกิดความเสียหายน้อยและไม่สามารถลับคมให้อนุภาคซัดสีเกิดคมใหม่ได้ แต่ตัวประสานที่เป็นแก้วนั้นมีความแข็งใกล้เคียงกับหินลับคม สิ่งที่เกิดขึ้นขณะลับคมครั้งแรกคือ การสึกหรอของตัวประสานหรือการทำให้ตัวประสานส่วนเกินหลุดออกจากผิวของล่อเจียระไนเท่านั้น

#### 4.7.1.3 ล่อเจียระไนหลังใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ขึ้น

การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของล่อเจียระไนหลังใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ขึ้น เห็นได้ชัดเจนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดทั้งแบบกัดด้วยกรดกัดแก้วและไม่กัดกรด พบว่าเกิดการสึกหรอของอนุภาคซัดสีเกิดขึ้น นั่นคืออนุภาคซัดสีสูญเสียมซึ่งปรากฏเป็นลักษณะแบนราบบนอนุภาคซัดสี ส่วนตัวประสานยังคงติดอยู่บนผิวของอนุภาคซัดสี (ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก่อนการกัดกรด หัวข้อ 4.2.3) ถึงแม้ว่าอนุภาคซัดสีจะเกิดการสึกหรอไปแล้ว แต่ยังคงมีตัวประสานมาเกาะติดอยู่บนอนุภาคซัดสีนั้นเกิดขึ้นขณะเจียระไน กล่าวคือ ขณะเจียระไนการสะสมของประสานที่ถูกกำจัดและเศษวัสดุในที่นี่คือ อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ยังคงเหลือเกิดการสะสมบริเวณผิวของอนุภาคซัดสี สามารถจำลองได้ดังภาพที่ 4.3.3



ภาพที่ 4.30 ภาพจำลองภาพตัดขวางของล่อเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซีซี

เมื่อตรวจสอบลักษณะโปรไฟล์และความหนาผิวก็พบว่าสอดคล้องกับภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือค่าความหนาผิวของล่อเจียรไนลดลงเหลือ 1.075 ไมโครเมตร จาก 1.250 ไมโครเมตร (ล่อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรก) ซึ่งค่าความหนาผิวที่ลดลงเกิดจากการสึกหรอของอนุภาคขัดสีนั่นเอง

#### 4.7.1.4 ล่อเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซีซี

หลังจากลับคมล่อเจียรไนที่ผ่านการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซีซี เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของล่อเจียรไนคล้ายกับสัณฐานวิทยาของล่อเจียรไนก่อนลับคมแบบปกติ กล่าวคือยังคงเห็นการสึกหรอแบบเสียดสี และตัวประสานยังคงปกคลุมอนุภาคขัดสีอยู่ และเมื่อดูลักษณะโปรไฟล์ และวัดความหนาผิวของล่อเจียรไนพบว่า ลักษณะโปรไฟล์คล้ายคลึงกับล่อเจียรไนก่อนการลับคม และยังมีค่าความหนาผิวที่ใกล้เคียงกันคือ 1.047 ไมโครเมตรสำหรับล่อเจียรไนหลังลับคม และ 1.075 ไมโครเมตรสำหรับล่อเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สิบห้าครั้ง ภาพจำลองภาพตัดขวางของล่อเจียรไนที่สภาวะนี้จึงเหมือนกับภาพจำลองภาพตัดขวางของล่อเจียรไนที่สภาวะหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซีซี ดังภาพที่ 4.31



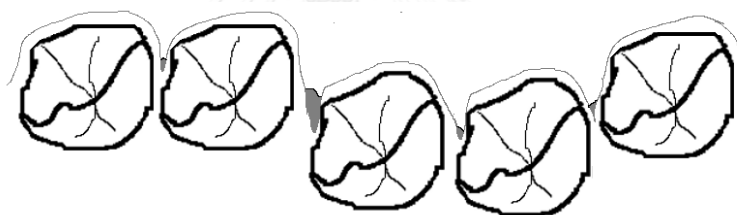
ภาพที่ 4.31 ภาพจำลองภาพตัดขวางของล่อเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซีซี

สาเหตุที่ทำให้ลักษณะสัณฐานวิทยาของล่อเจียรไนไม่เปลี่ยนแปลงนั้นเนื่องจากเหตุผลเดียวกับหัวข้อ 4.8.1.2 กล่าวคือความแข็งของหินลับคมมีค่าน้อย ไม่สามารถทำให้อนุภาคขัดสีเกิดการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งการลับคมล่อเจียรไนหลังจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซีซีนั้นเป็นการลับคมแค่ 1 ครั้ง (ล่อเจียรไนเคลื่อนผ่านหินลับคมแค่ 1 ครั้ง) ซึ่งแตกต่างจากการลับคมครั้งแรกที่เป็นการลับคม 20 ครั้ง ส่วนสาเหตุที่ค่าความหนาผิวหลังลับคมนั้นลดลง

เล็กน้อยนั้น อาจมาจากการล้มคมเป็นเพียงการกำจัดตัวประสานที่ปกคลุมอนุภาคขัดสีออกจำนวนน้อย หรืออาจเป็นความคลาดเคลื่อนของการเก็บข้อมูลค่าความหยาบผิว

#### 4.7.1.5 ล้อเจียรระไนหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น

การเปลี่ยนของสัญญาณวิทยาของล้อเจียรระไนหลังใช้อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์นั้น เมื่อดูภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ไม่สามารถมองเห็นลักษณะของอนุภาคขัดสีได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาภาพอนุภาคขัดสีที่อยู่บนล้อเจียรระไนหลังผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้วที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบการสึกหรอของอนุภาคขัดสีอย่างชัดเจน เมื่อวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่สึกหรอ (Wear flat) และนำมาเปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่สึกหรอของอนุภาคขัดสีบนล้อเจียรระไนหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น พบว่ามีเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่สึกหรอแบบเสียมคมที่ใหญ่กว่า กล่าวคือ 5.061 ไมโครเมตร สำหรับล้อเจียรระไนที่ผ่านการเจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น และ 4.451 ไมโครเมตร สำหรับล้อเจียรระไนที่ผ่านการใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น ดังนั้นจึงสามารถจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรระไนได้ดังภาพที่ 4.32

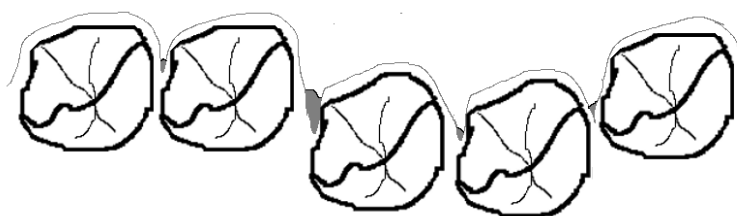


ภาพที่ 4.32 ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรระไนหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น

ถึงแม้ว่าจะเกิดการสึกหรอของอนุภาคขัดสีหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นไปแล้วก็ตาม ก็ยังพบตัวประสานที่ยังคงปกคลุมอนุภาคขัดสีอยู่ ซึ่งการที่มีตัวประสานปกคลุมอนุภาคขัดสีนั้นเกิดขึ้นขณะเจียรระไนนั่นเอง และเมื่อพิจารณาถึงความหยาบผิวของล้อเจียรระไนทั้งๆ ที่อนุภาคขัดสีบนล้อเจียรระไนหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นเกิดการสึกหรอมากกว่า แต่กลับมีค่าความหยาบผิวมากกว่า (1.075 และ 1.123 ไมโครเมตรหลังเจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 และ 30 ชั้นตามลำดับ) เนื่องจากผลของการเสียวคมตรงของล้อเจียรระไนซึ่งอาจเกิดมาจากการสึกหรอของตัวประสานที่ทำให้ตำแหน่งนั้นเกิดหลุมลักษณะใหญ่ (ดูได้จากลักษณะโปรไฟล์ในหัวข้อ 4.4.5) ซึ่งเมื่อนำไปวัดความหยาบผิวจึงทำให้มีค่าความหยาบผิวที่สูงกว่า

#### 4.7.1.6 ล้อเจียรระไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.8.1.4 การลับคมเพียง 1 ครั้ง ไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของล้อเจียรระไน ภาพสัณฐานวิทยาของล้อเจียรระไนหลังลับคมจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงมีลักษณะคล้ายสัณฐานวิทยาของล้อเจียรระไนหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และเมื่อตรวจสอบลักษณะโปรไฟล์และพบว่า ลักษณะโปรไฟล์คล้ายคลึงกัน อีกทั้งมีค่าความหยาบผิวที่ใกล้เคียงกันมาก ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรระไนหลังลับคมต่อจากการใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สามสิบครั้งจึงเหมือนกับภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรระไนหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สามสิบครั้ง ดังภาพที่ 4.33



ภาพที่ 4.33 ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรระไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น

#### 4.7.1.7 ล้อเจียรระไนหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น

สิ่งที่เห็นได้ชัดถึงความเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของล้อเจียรระไนหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นที่แตกต่างจากล้อเจียรระไนหลังลับคมต่อจากการใช้เจียรระไน 30 ชั้นคือ ที่สภาวะการใช้งานนี้พบปริมาณรูพรุนที่น้อยมาก บริเวณรอบๆ อนุภาคขัดสีเต็มไปด้วยเนื้อวัสดุที่อัดแน่น ผิวของล้อเจียรระไนเต็มไปด้วยเศษวัสดุที่เกิดจากการเจียรระไน เมื่อตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อเจียรระไนที่ผ่านการกัดกรดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ก็พบว่าที่สภาวะการใช้งานนี้อนุภาคขัดสีเกิดความเสียหายมากกว่าการใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณสึกหรอเฉลี่ยเท่ากับ 6.308 ไมโครเมตร สามารถจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรระไนได้ดังภาพที่ 4.34



ภาพที่ 4.34 ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อเจียรระไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น

การสึกหรอของอนุภาคขั้วดีที่สภาวะการใช้งานนี้จะมากกว่าสภาวะการใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ขึ้นมากกว่าพอสมควร ค่าความหยาบผิวของล้อยเจียร์ไนที่สภาวะการใช้งานนี้จึงมีค่าลดลง คือมีค่าเท่ากับ 1.074 ไมโครเมตร ซึ่งค่าความหยาบผิวของล้อยเจียร์ไนหลังใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ขึ้นมีค่า 1.123 ไมโครเมตร

#### 4.7.1.8 ล้อยเจียร์ไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ขึ้น

ถึงแม้ว่าการลับคมเพียงแค่ 1 ครั้ง ไม่เพียงพอที่จะทำให้สัณฐานวิทยาของล้อยเจียร์ไนเกิดความเปลี่ยนแปลง แต่ในกรณีนี้แตกต่างออกไปจากสองกรณีก่อนหน้านี้ กล่าวคือ การเจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ขึ้นนั้นจะเกิดการสะสมของเศษวัสดุที่เกิดขึ้นขณะเจียร์ไนอัดในบริเวณช่องว่างและรูพรุนบนผิวของล้อยเจียร์ไน อีกทั้งยังมีเศษเจียร์ไนขนาดใหญ่ติดค้างอยู่บนผิวล้อยเจียร์ไน (ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด) ทำให้เมื่อทำการลับคมเพียงแค่ 1 ครั้งก็เพียงพอที่จะกำจัดเศษวัสดุเหล่านั้นให้หลุดออกไปได้ สามารถสังเกตจากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด หลังทำการลับคมบริเวณผิวของล้อยเจียร์ไนมีรูพรุน และมีลักษณะขรุขระ ไม่อัดแน่นด้วยเศษวัสดุที่เกิดจากการเจียร์ไน สามารถจำลองภาพตัดขวางได้ดังภาพที่ 4.35



ภาพที่ 4.35 ภาพจำลองภาพตัดขวางของล้อยเจียร์ไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ขึ้น

ถึงแม้การลับคม 1 ครั้ง จะสามารถกำจัดเศษวัสดุที่ติดในรูพรุนและบริเวณรอบ ๆ อนุภาคขั้วดีได้ แต่ก็ไม่สามารถกำจัดตัวประสานออกจากอนุภาคขั้วดีได้ ยังคงเห็นตัวประสานปกคลุมอนุภาคขั้วดีหลังการลับคมแล้วก็ตาม เมื่อพิจารณาความหยาบผิวและลักษณะโปรไฟล์ก็พบว่า ความหยาบผิวมีค่าลดลง และลักษณะโปรไฟล์มีความสูง-ต่ำลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเศษวัสดุที่ติดในรูพรุนและบนผิวล้อยเจียร์ไนถูกกำจัดออกไปนั่นเอง



#### 4.7.2 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

##### 4.7.2.1 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ที่ถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรก

เมื่อพิจารณาความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชิ้นแรก พบว่ามีความหยาบผิวที่สูงมากเท่ากับ 38.9 นาโนเมตร ซึ่งหากเชื่อมโยงกับสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนหลังลับคมครั้งแรกนั้น อาจกล่าวได้ว่าล้อเจียรไนหลังลับครั้งแรกมีความคมสูง (ค่าความหยาบผิวสูง) ดังนั้นเมื่อนำไปใช้เจียรไนไปเจียรไนวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชิ้นแรกจึงมีค่าความหยาบผิวที่สูง และเมื่อพิจารณาความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในชิ้นถัดไป พบว่าความหยาบผิวมีค่าลดลง และมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนถึงอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชิ้นที่ 15 สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการสึกหรอของอนุภาคขัดสีที่ได้อภิปรายไปแล้วในหัวข้อ 4.8.1.4 เมื่ออนุภาคขัดสีสึกหรอเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ต่อการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในแต่ละครั้ง ค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จึงลดลงตามความหยาบผิวของล้อเจียรไนที่ลดลง

เมื่อพิจารณาค่ากระแสของมอเตอร์ขณะเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชิ้นแรกพบว่ามีค่าเท่ากับ 950 มิลลิแอมป์ และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในชิ้นถัดไปจนถึงชิ้นที่ 15 สาเหตุที่ค่ากระแสของมอเตอร์เพิ่มขึ้นนั้นมาจากการสึกหรอของอนุภาคขัดสีที่เพิ่มขึ้นต่อการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในแต่ละครั้ง เมื่อการสึกหรอของอนุภาคขัดสีเริ่มเกิดขึ้น แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคขัดสีและอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในแต่ละชิ้นแรงต้านการหมุนของล้อเจียรไนจะเพิ่มขึ้น แรงต้านการหมุนของล้อเจียรไนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้รอบการหมุนของล้อเจียรไนลดลงจาก 10,000 รอบ/นาที่ แต่เนื่องจากเครื่องเจียรไนถูกตั้งโปรแกรมให้มอเตอร์ที่ควบคุมการหมุนของล้อเจียรไนหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ 10,000 รอบ/นาที่ ดังนั้นโปรแกรมของเครื่องเจียรไนจึงต้องเพิ่มกระแสของมอเตอร์เพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่

##### 4.7.2.2 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชิ้นที่ถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชิ้น

จากที่ได้อภิปรายไปแล้วว่าการลับคมเพียง 1 ครั้ง ไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไน ดังนั้นถึงล้อเจียรไนจะผ่านการลับคมมาแล้วก็ตาม เมื่อนำมาเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์เพิ่มอีกสามสิบชิ้นก็เปรียบเสมือนนำล้อเจียรไนที่ผ่านการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์มาแล้ว 15 ชิ้นมาเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ต่อ ซึ่งพบว่าค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชิ้นแรกมีค่าเท่ากับ 18.2 นาโนเมตร และมีค่าความ

หยาบผิวอยู่ในช่วง 18 ถึง 20 นาโนเมตร สำหรับอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นที่เหลื่อ การสึกหรอของอนุภาคขัดสีระหว่างการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 30 ชั้น

ในทำนองเดียวกัน ค่ากระแสของมอเตอร์ขณะเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้นนั้นมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยต่อการเจียรไนในแต่ละชั้น เนื่องมาจากสาเหตุเดียวกับค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ กล่าวคือการสึกหรอของอนุภาคขัดสีค่อนข้างต่ำ ดังนั้นกระแสของมอเตอร์ขณะเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สามสิบชั้นนั้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น

#### 4.7.2.3 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นที่ถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น

ในทำนองเดียวกับการอภิปรายในหัวข้อ 4.8.2.2 การลับคมเพียง 1 ครั้ง ไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนสัณฐานวิทยาของล้อเจียรไนได้ ดังนั้นถึงแม้ว่าจะนำล้อเจียรไนหลังการลับคมมาใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์อีก 45 ชั้นจึงเสมือนนำล้อเจียรไนที่ผ่านการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นแล้วมาใช้เจียรไนต่อ ค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นแรกจากสี่สิบห้าชั้นนั้นมีค่าเท่ากับ 31.5 นาโนเมตร และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ในชั้นถัดมาจนถึงชั้นที่ 45 ที่มีความหยาบผิวเท่ากับ 17.9 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับภาพของล้อเจียรไนที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้ว (ภาพที่ 4.12) ที่วัดค่าความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณที่สึกหรอที่วัดได้มีค่า 6.308 ไมโครเมตร ซึ่งแปลว่าอนุภาคขัดสีที่ใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สี่สิบห้าชั้นนั้นสึกหรอมาก เมื่อเกิดการสึกหรอมากก็จะทำให้ความหยาบผิวของล้อเจียรไนลดลง จึงส่งผลให้อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ถูกเจียรไนมีค่าลดลงดังผลการทดลองที่ได้

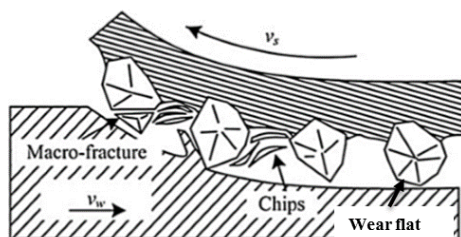
ค่ากระแสของมอเตอร์ที่ใช้ขณะเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ต่อการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในแต่ละชั้นตามการสึกหรอของล้อเจียรไนที่ได้กล่าวไว้แล้วสิ่งที่พบเพิ่มเติมของค่ากระแสของมอเตอร์สำหรับการเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สี่สิบห้าชั้นคือ จากภาพที่ 4.27 ค่ากระแสของมอเตอร์ขณะเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลังชั้นที่ 35 มีค่าลดลงอย่างชัดเจน ทั้งๆ ที่ก่อนหน้านี้มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นมาตลอด เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในทางทฤษฎีคืออนุภาคขัดสีเกิดการปรับเปลี่ยนรูปร่าง กล่าวคือมีความสามารถในการลับคมด้วยตัวเอง (self-dressing) แม้ว่าจะไม่ได้ผ่านกระบวนการลับคม [15] ซึ่งก็คาดว่าเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้ในการทดลองนี้เนื่องจากเมื่อตรวจสอบค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นที่ 37, 42, 43 และ 44 พบว่าค่าความหยาบผิวมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ชั้นก่อนหน้า

### 4.7.3 พฤติกรรมการสึกหรอของล้อเจียรระโน (Wheel wear mechanism)

จากหัวข้อที่ 4.7.1 และ 4.7.2 สามารถแบ่งพฤติกรรมการสึกหรอของล้อเจียรระโนได้ออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

#### 4.7.3.1 การสึกหรอช่วงแรก (Initial wear region)

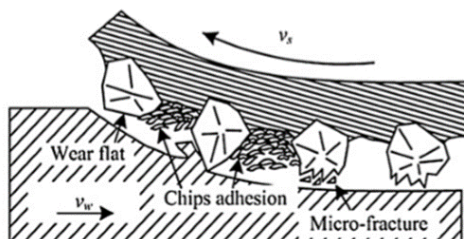
การสึกหรอในช่วงแรกจะเป็นการสึกหรอของล้อเจียรระโนขณะเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น เนื่องจากความหยาบผิวของล้อเจียรระโนที่ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการสึกหรอแบบเสียมคม โดยการสึกหรอในช่วงแรกเกิดจากอนุภาคขัดสีที่โผล่เหนือบริเวณรอบๆ มากเกินไปจึงเกิดการสึกหรอแบบการแตกหักของอนุภาคขัดสีอย่างรุนแรง (Macro fracture) และการเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์จำนวนน้อยการสะสมของเศษเจียรระโนจึงมีน้อยเช่นกัน ซึ่งการทดลองมีผลการทดลองที่คล้ายกับการสึกหรอของล้อเจียรระโนแบบเรซินที่ได้มีการรายงานไว้แล้ว [8] จึงขอใช้ภาพจำลองของรายงานดังกล่าวมาอภิปรายผลดังภาพที่ 4.36



ภาพที่ 4.36 ภาพจำลองการสึกหรอช่วงแรกของล้อเจียรระโน [8]

#### 4.7.3.2 การสึกหรอช่วงคงที่ (Steady wear region)

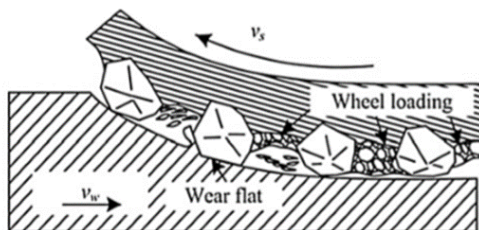
สำหรับการสึกหรอของล้อเจียรระโนช่วงคงที่จะเกิดขึ้นขณะเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ใน 30 ชั้นถัดมา เนื่องจากอนุภาคขัดสีโผล่เหนือบริเวณรอบๆ น้อยกว่าที่แรก การสึกหรอของล้อเจียรระโนส่วนใหญ่จึงเป็นการสึกหรอแบบการแตกหักของอนุภาคขัดสีเพียงเล็กน้อย (Micro fracture) ซึ่งการสึกหรอแบบนี้จะทำให้อนุภาคขัดสีเกิดการล้มครืนในตัวเอง การใช้ล้อเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ใน ช่วง 30 ชั้นถึงใช้กระแสของมอเตอร์ค่อนข้างคงที่ และมีความหยาบผิวของชิ้นงานที่ค่อนข้างคงที่เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถจำลองการสึกหรอช่วงคงที่ได้ดังภาพที่ 4.37



ภาพที่ 4.37 ภาพจำลองการสึกหรอช่วงคงที่ของล้อเจียรระโน [8]

### 4.7.3.3 การสึกหรอช่วงถดถอย (Deteriorate wear region)

การสึกหรอช่วงถดถอยของล้อเจียร์ไนเกิดขึ้นขณะใช้เจียร์ไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ซีน ดังจะเห็นจากผลของกระแสของมอเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการสึกหรอในช่วงนี้เกิดการสะสมของเศษวัสดุที่มากเกินไปดังแสดงดังภาพที่ 4.38



ภาพที่ 4.38 ภาพจำลองการสึกหรอของล้อเจียร์ไนช่วงถดถอย [8]

จากภาพจะเห็นว่าปลายของอนุภาคขัดสีอยู่เสมอกับเศษวัสดุที่ติดสะสมบริเวณข้างๆ ซึ่งการเกิดเหตุการณ์แบบนี้จะทำให้ความสามารถในการเจียร์ไนของล้อเจียร์ไนลดลงอย่างมาก การสึกหรอแบบเสียมก็พบได้จากการทดลองนี้เช่นกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 พฤติกรรมการสึกหรอของล้อยเจียรไนที่พบได้แก่ การเสียมของอนุภาคขัดสี (flattening), การสึกหรอของตัวประสาน (bond wear) ซึ่งการสึกหรอแบบ flattening พบได้บนล้อยเจียรไนทุกสภาวะการใช้งาน (หลังจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15, 30 และ 45 ชั้น) และสามารถยืนยันว่าเกิดการสึกหรอแบบนี้ด้วยภาพล้อยเจียรไนที่ผ่านการกัดกรดด้วยกรดกัดแก้ว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เมื่อทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่สึกหรอที่อยู่บนอนุภาคขัดสีพบว่า หลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15, 30 และ 45 ชั้น ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่สึกหรอมีค่าเท่ากับ 4.451, 5.061 และ 6.308 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าการใช้ล้อยเจียรไนเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ไปเรื่อยๆ จะทำให้อนุภาคขัดสีเกิดการสึกหรอที่มากขึ้น ส่วนการสึกหรอของตัวประสานนั้นพบได้น้อยโดยพบหลังจากใช้งานล้อยเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ไป 15 ชั้น ในบางบริเวณของล้อยเจียรไนเท่านั้น

5.1.2 สันฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมครั้งแรกมีความเปลี่ยนแปลงเฉพาะบริเวณที่เป็นตัวประสาน กล่าวคือการลับคมครั้งแรกจะเป็นการกำจัดตัวประสานส่วนเกินที่ปกคลุมอนุภาคขัดสีและบริเวณข้างๆ อนุภาคขัดสีออกไป ซึ่งการลับคมจะไม่เปลี่ยนแปลงสันฐานวิทยาของอนุภาคขัดสีเนื่องจากค่าความแข็ง โดยค่าความแข็งของอนุภาคขัดสีซึ่งเป็นเพชรที่มีความแข็งอยู่ในช่วง 7,000-14,000 HV แต่หินลับคมซึ่งทำมาจากอะลูมินามีความแข็งอยู่ที่ 1,400 HV ส่วนความแข็งของตัวประสานซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่จึงมีความแข็งใกล้เคียงกับหินลับคม ขณะทำการลับคมเนื้อวัสดุที่ถูกกำจัดจึงเป็นเพียงตัวประสาน

สันฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังการลับคม 1 ครั้งสามารถเปลี่ยนสันฐานวิทยาของล้อยเจียรไนได้เฉพาะกรณีที่มีเศษที่เกิดขึ้นขณะเจียรไนติดในรูพรุนและบริเวณรอบๆ อนุภาคขัดสีเท่านั้น กล่าวคือหลังสภาวะการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้นซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, ลักษณะโปรไฟล์และค่าความหยาบผิวของล้อยเจียรไน แต่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงสันฐานวิทยาของล้อยเจียรไนที่ใช้เจียรไนน้อย ๆ ได้ (15 และ 30 ชั้น) เห็นได้จากภาพที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งไม่เห็นความเปลี่ยนแปลงของสันฐานวิทยาและค่าความหยาบผิวของล้อยเจียรไนที่ไม่เปลี่ยนแปลง

5.1.3 ค่าความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ถูกเจียรไนจะมีค่าแปรผันกับค่าความหยาบผิวของล้อยเจียรไน กล่าวคือ หากความหยาบผิวของล้อยเจียรไนมีค่ามากเมื่อนำมาเจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ก็จะมีค่าความหยาบผิวที่มากด้วย และหากความหยาบผิวของล้อยเจียรไนมีค่าน้อย (เกิดการสึกหรอ) ก็จะทำให้อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ถูกเจียรไนมีความหยาบผิวน้อยลงไปด้วย

5.1.4 ค่ากระแสของมอเตอร์แปรผันตรงกับการสึกหรอของล้อยเจียรไน กล่าวคือ หากล้อยเจียรไนเกิดการสึกหรอมาก (เส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณสึกหรมีค่ามาก) ก็จะส่งผลให้กระแสของมอเตอร์ที่ต้องใช้ขณะเจียรไนมีค่ามาก เนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของอนุภาคซัดสีและอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น แต่หากการสึกหรอของล้อยเจียรไนมีค่าน้อยกระแสของมอเตอร์ที่ต้องใช้ในการเจียรไนก็จะมีค่าน้อยลงไปด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนที่สภาวะต่าง ๆ อาจทำการตรวจสอบด้วยวิธีอื่น เช่น กล้องจุลทรรศน์เลเซอร์แบบสามมิติ เนื่องจากหลังใช้เจียรไนความสามารถในการนำไฟฟ้าของล้อยเจียรไนจะลดลง จึงมีข้อจำกัดเมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการเห็นภาพเชิง 3 มิติก็อาจจะสามารถตรวจสอบสัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนได้แม่นยำขึ้น

5.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาอาจทำการศึกษาโดยการเจียรไนเป็นระยะทางยาว ๆ กล่าวคือ เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์หลายๆ ชั้น เช่น 100 หรือ 200 ชั้น และนำมาตรวจสอบสัณฐานวิทยาเพื่อดูความเปลี่ยนแปลง

5.2.3 การศึกษาสัณฐานวิทยาหลังล้มคมควรเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการล้มคมปกติขณะเจียรไน กล่าวคือ อาจเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการล้มคมปกติให้เหมือนกับการล้มคมครั้งแรกและดูการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไน

5.2.4 ศึกษาความเค้นที่ตกค้างในชิ้นงานเพิ่มเติม เพื่อเป็นตัวบ่งชี้อีกตัวถึงคุณภาพของการเจียรไน โดยอาจจะหาวิธีเพื่อที่จะวัดความเค้นตกค้างภายในชิ้นงานในแต่ละชั้น และเปรียบเทียบค่าความเค้นตกค้างเพื่อเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของการเจียรไน

## รายการอ้างอิง

1. ธรรมสุนทร, ส., ความเค้นตกค้างบนผิววัสดุผสม  $Al_2O_3-TiC$  จากกระบวนการเจียรไน. 2013.
2. Dangtip, J., *Effect of Binder and Diamond Grain Size on Roughness and Optical Bow of a Hard Disk Slider Bar*. 2014.
3. Rowqe, W.B., *Principles of Modern Grinding Technology*. 2009.
4. Loan D. Marinescu, M.H., Eckart Uhlmann, W. Brian Rowe, Ichiro Lnasaki, *Handbook of Machining with Grinding Wheels*.
5. T.W. Liao, K.L., S.B. McSpadden, L.J. O'Rourke, *Wear of diamond wheel in creep-feed grinding of ceramic materials I. Mechanism*. *Wear*, 1997: p. 94-103.
6. T.W. Liao, K.L., S.B. McSpadden, L.J. O'Rourke, *Wear of diamond wheel in creep-feed grinding of ceramic materials II. Effect of process responses and strength*. *Wear*, 1997: p. 104-114.
7. T. Matsuo, M.T., H. Yamada, *High-Precision Surface Grinding of Ceramics with Superfine Grain Diamond Cup Wheels*. 1997.
8. Zhiqiang Liang, X.W., Yongbo Wu, Lijing Xie, Zhibing Liu, Wenzhang Zhao, *An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of monocrystal sapphire*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012: p. 868-876.
9. Ichida, Y., *Fractal Analysis of Micro Self-Sharpening Phenomenon in Grinding with Cubic Boron Nitride (cBN) Wheels* 2012.
10. Loan D. Marinescu, W.B.R., Boris Dimitrov, Ichiro Inasaki and *TRIBOLOGY OF ABRASIVE MACHINING PROCESSES*. 2004.
11. Samuel B., M.J., G. R. H., *A Systematic Method for Grinding Wheel Performance Evaluation*.
12. H.H. GATZEN, C.M., J.ZEADAN, *DIAMOND WEAR DURING PRECISION GRINDING OF BRITTLE MATERIALS*. Vol. III. 2000. 163-168.
13. Yasuyuki KUROSHIMA, Y.K., Shojiro OKADA, *Development of Vitrified Diamond Grinding Wheel for Engineering Ceramics*. 1985.

14. M. J. JACKSON, N.B., B. MILLS, *The effect of bond composition on the strength of partially-bonded vitrified ceramic abrasives*. JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTER 13, 1994: p. 1287-1289.
15. Yiyang Zhou, M.A., Donald Golini, Maynard Smith, Paul D. Funkenbuseh, *Wear and self-sharpening of vitrified bond diamond wheels during sapphire grinding* WEAR, 1998. 219: p. 42-45.



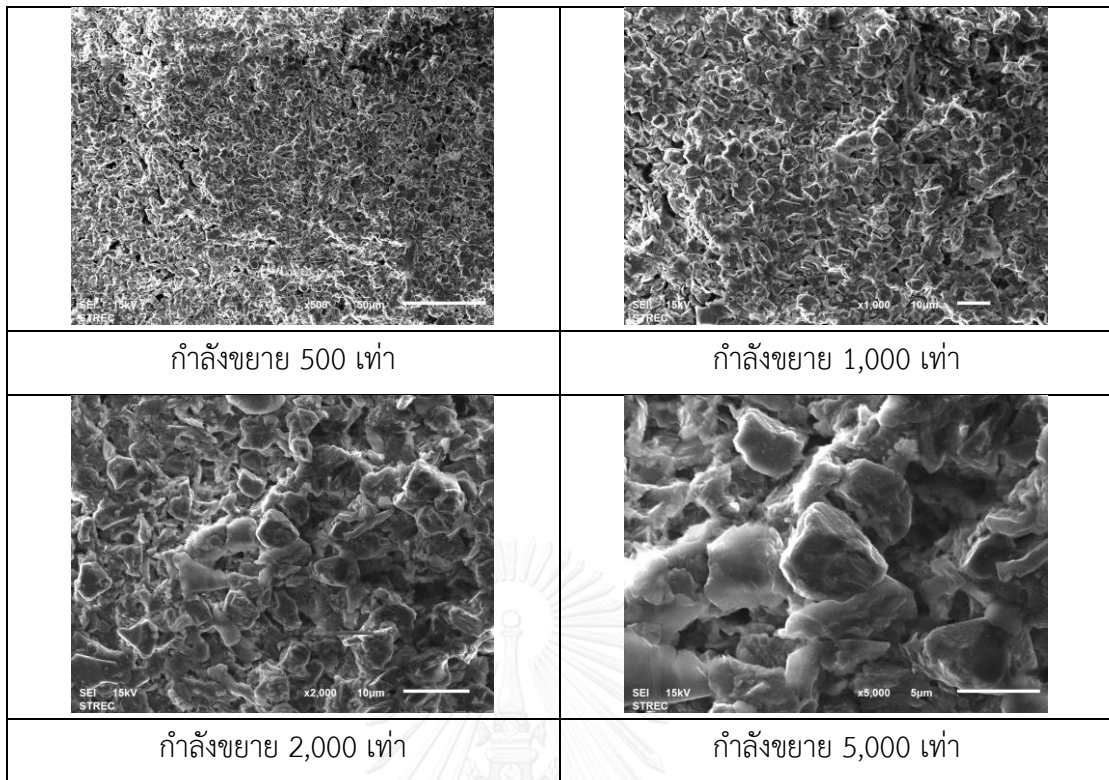




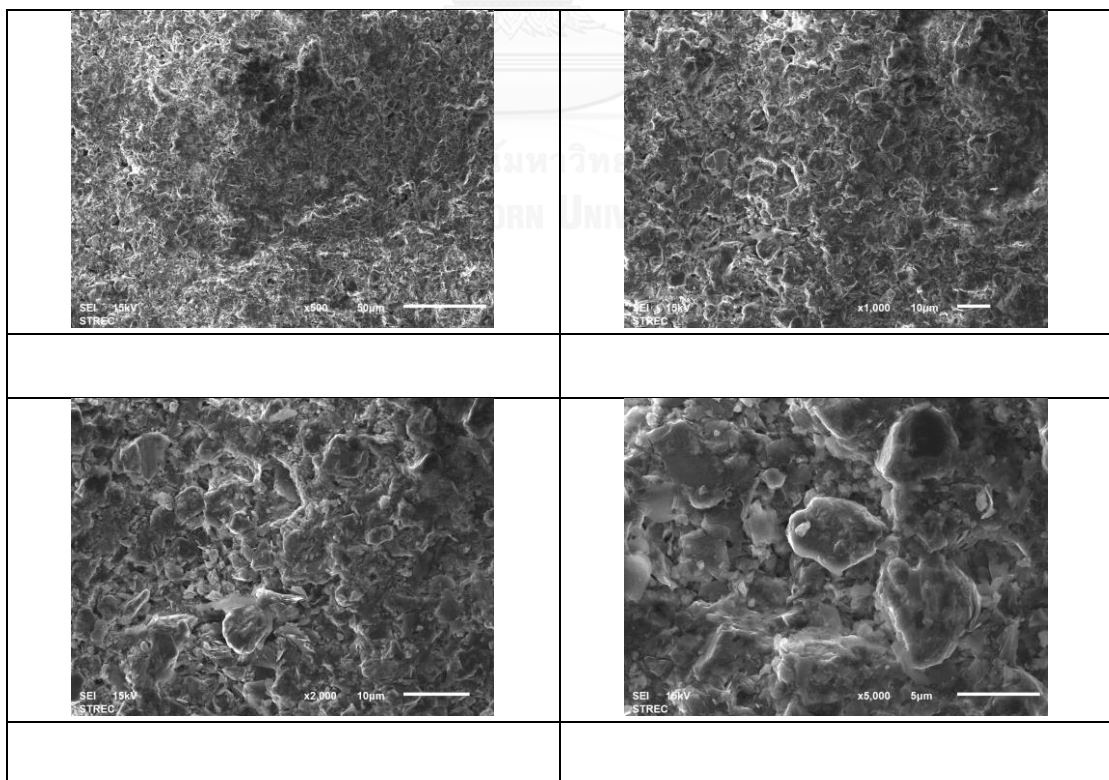
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

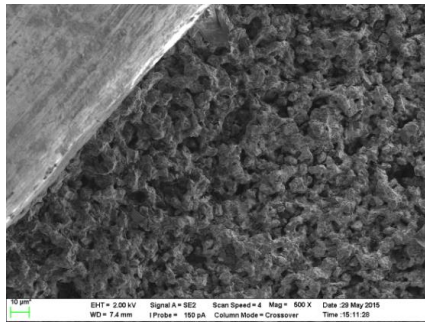




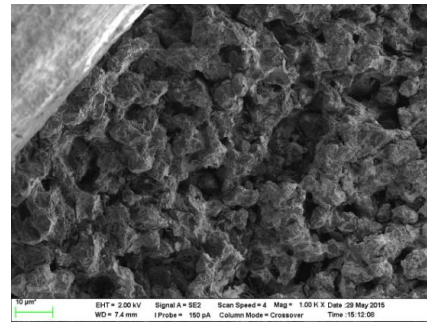
ภาพที่ ก-1 ภาพตัดขวาง (Cross section) ของล้อยเจียระไนที่ผ่านการกักกรดด้วยกรดกัตแก้ว



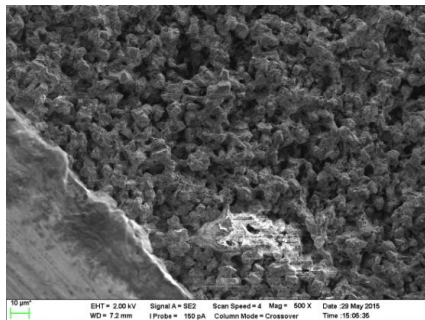
ภาพที่ ก-2 ภาพตัดขวาง (Cross section) ของล้อยเจียระไน



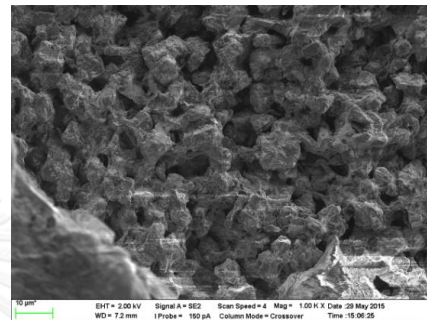
ตำแหน่งที่หนึ่ง กำลังขยาย 500 เท่า



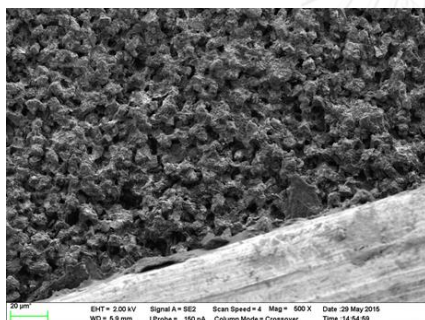
ตำแหน่งที่หนึ่ง กำลังขยาย 1,000 เท่า



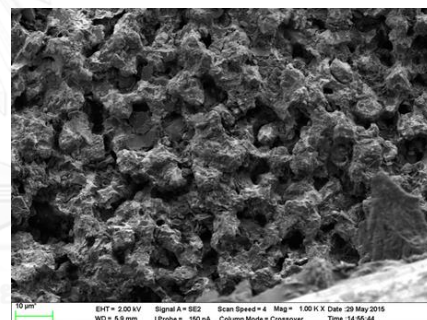
ตำแหน่งที่สอง กำลังขยาย 500 เท่า



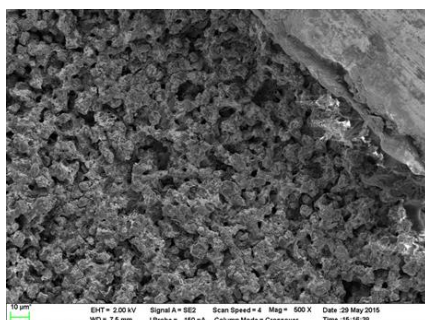
ตำแหน่งที่สอง กำลังขยาย 1,000 เท่า



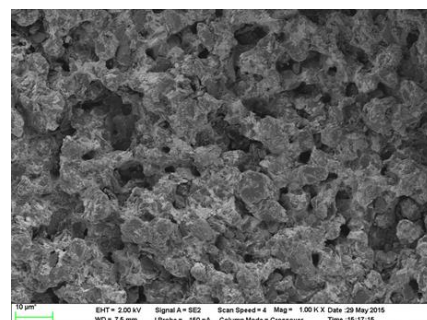
ตำแหน่งที่สาม กำลังขยาย 500 เท่า



ตำแหน่งที่สาม กำลังขยาย 1,000 เท่า

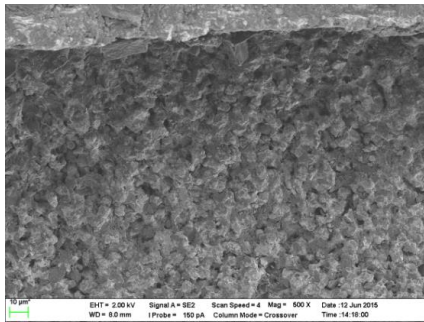


ตำแหน่งที่สี่ กำลังขยาย 500 เท่า

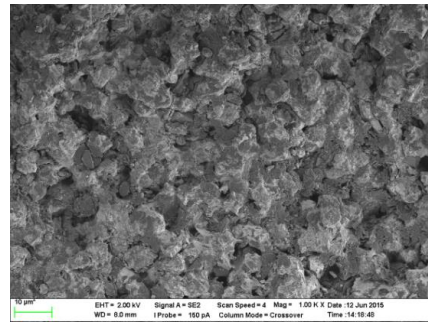


ตำแหน่งที่สี่ กำลังขยาย 1,000 เท่า

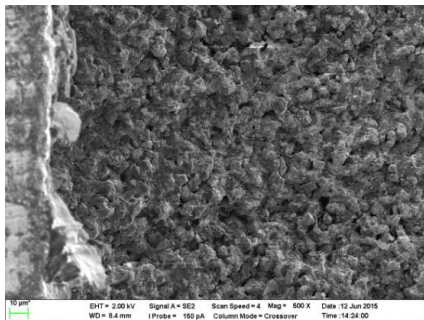
ภาพที่ ก-3 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนที่ได้รับมาทั้งสี่ตำแหน่งที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า



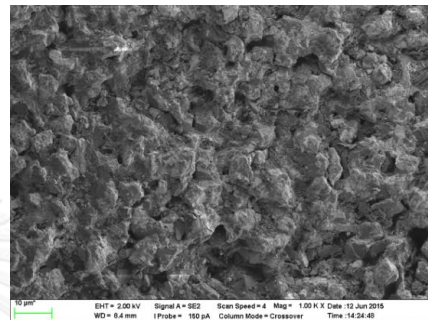
ตำแหน่งที่หนึ่ง กำลังขยาย 500 เท่า



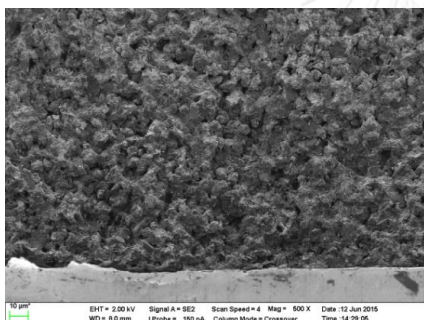
ตำแหน่งที่หนึ่ง กำลังขยาย 1,000 เท่า



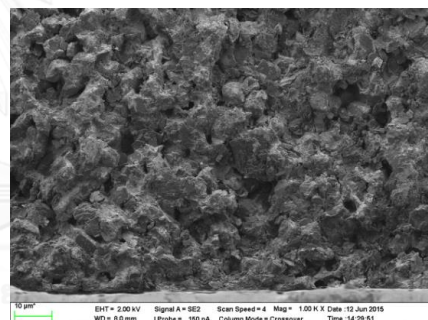
ตำแหน่งที่สอง กำลังขยาย 500 เท่า



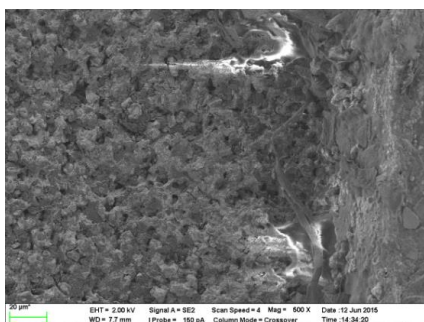
ตำแหน่งที่สอง กำลังขยาย 1,000 เท่า



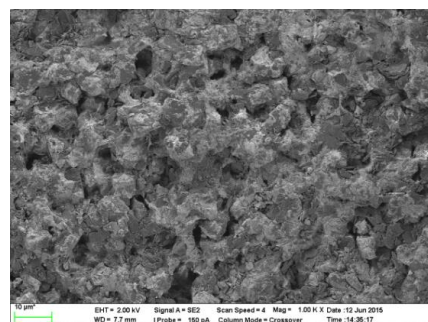
ตำแหน่งที่สาม กำลังขยาย 500 เท่า



ตำแหน่งที่สาม กำลังขยาย 1,000 เท่า

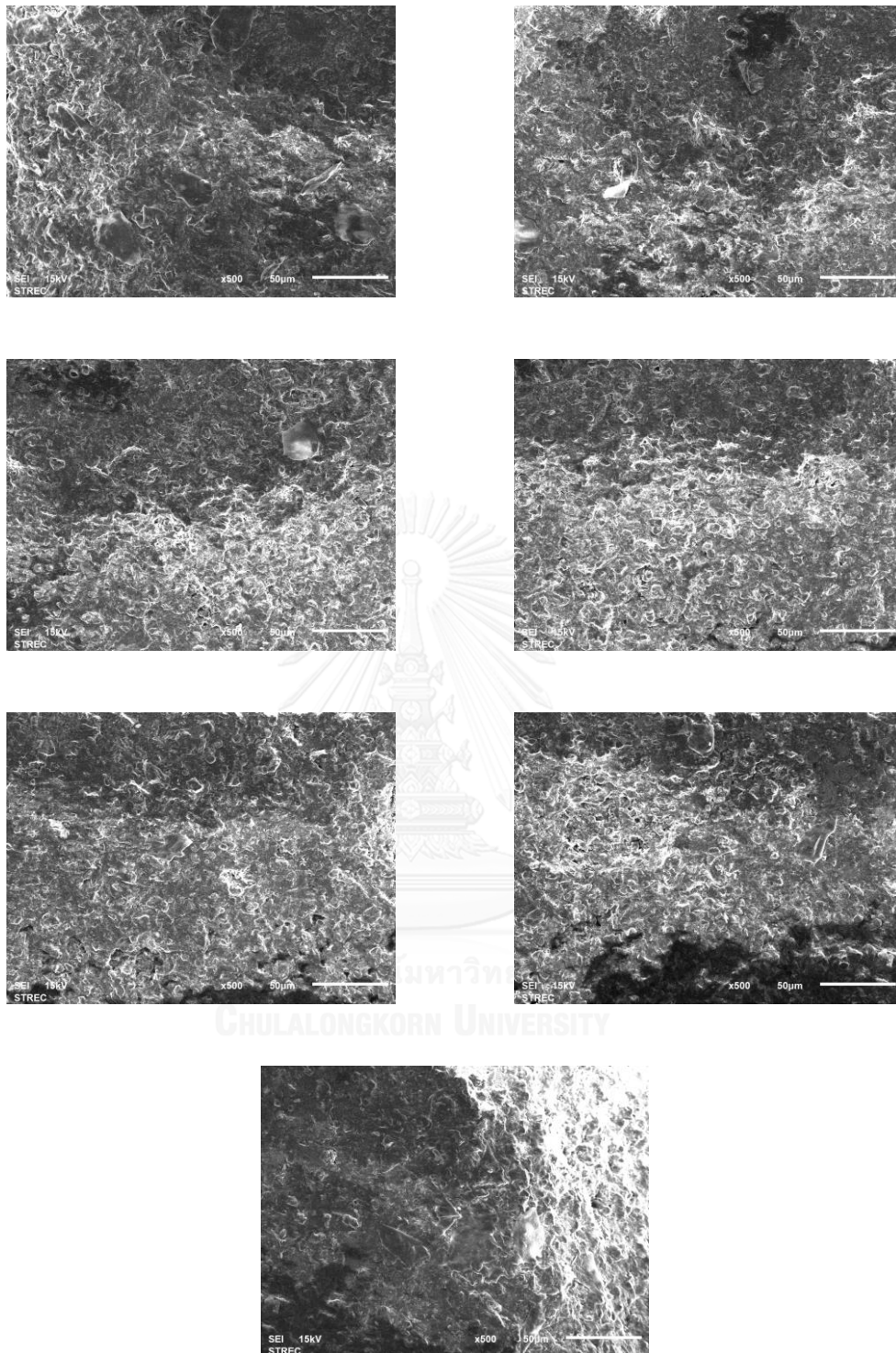


ตำแหน่งที่สี่ กำลังขยาย 500 เท่า

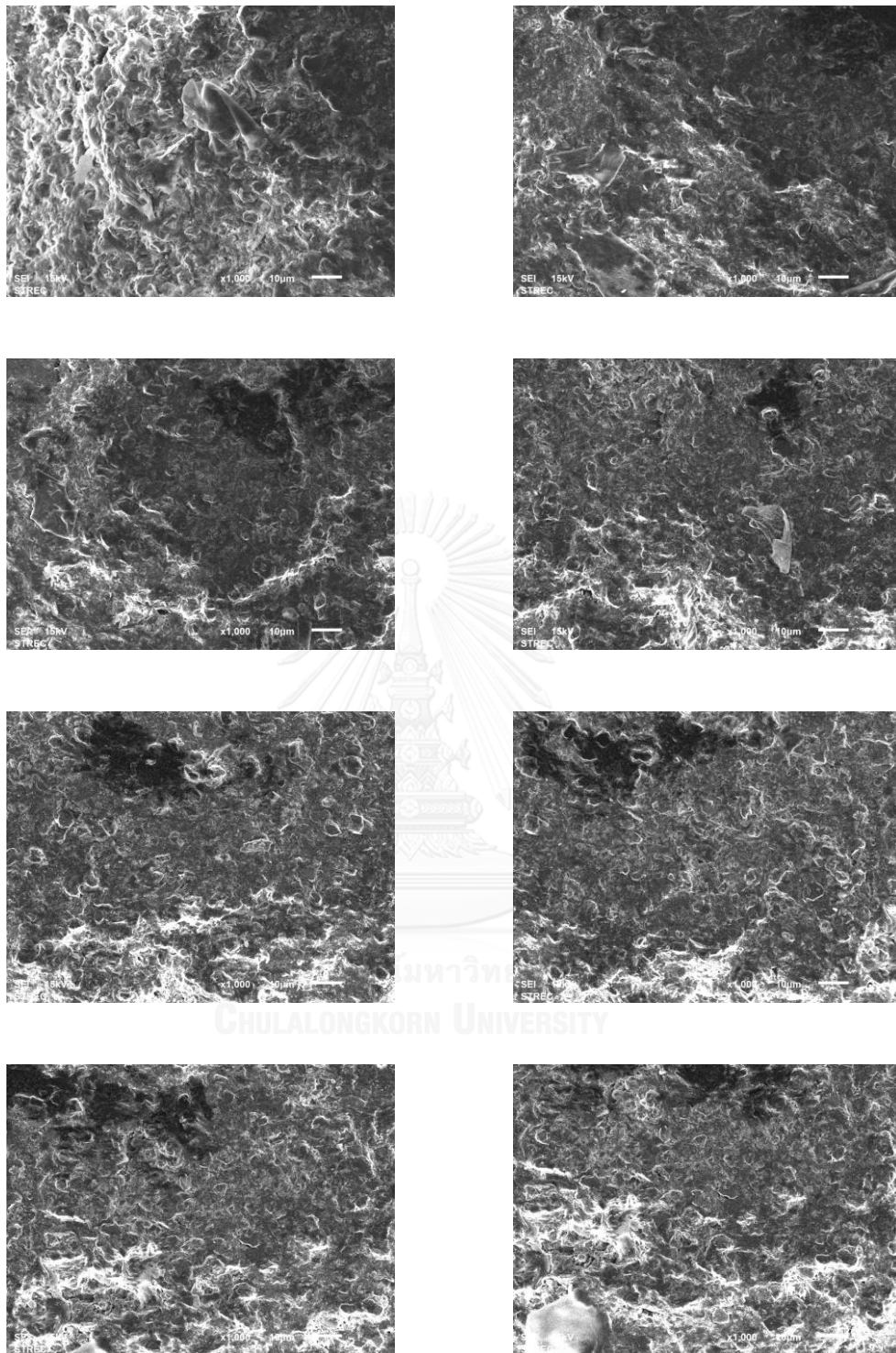


ตำแหน่งที่สี่ กำลังขยาย 1,000 เท่า

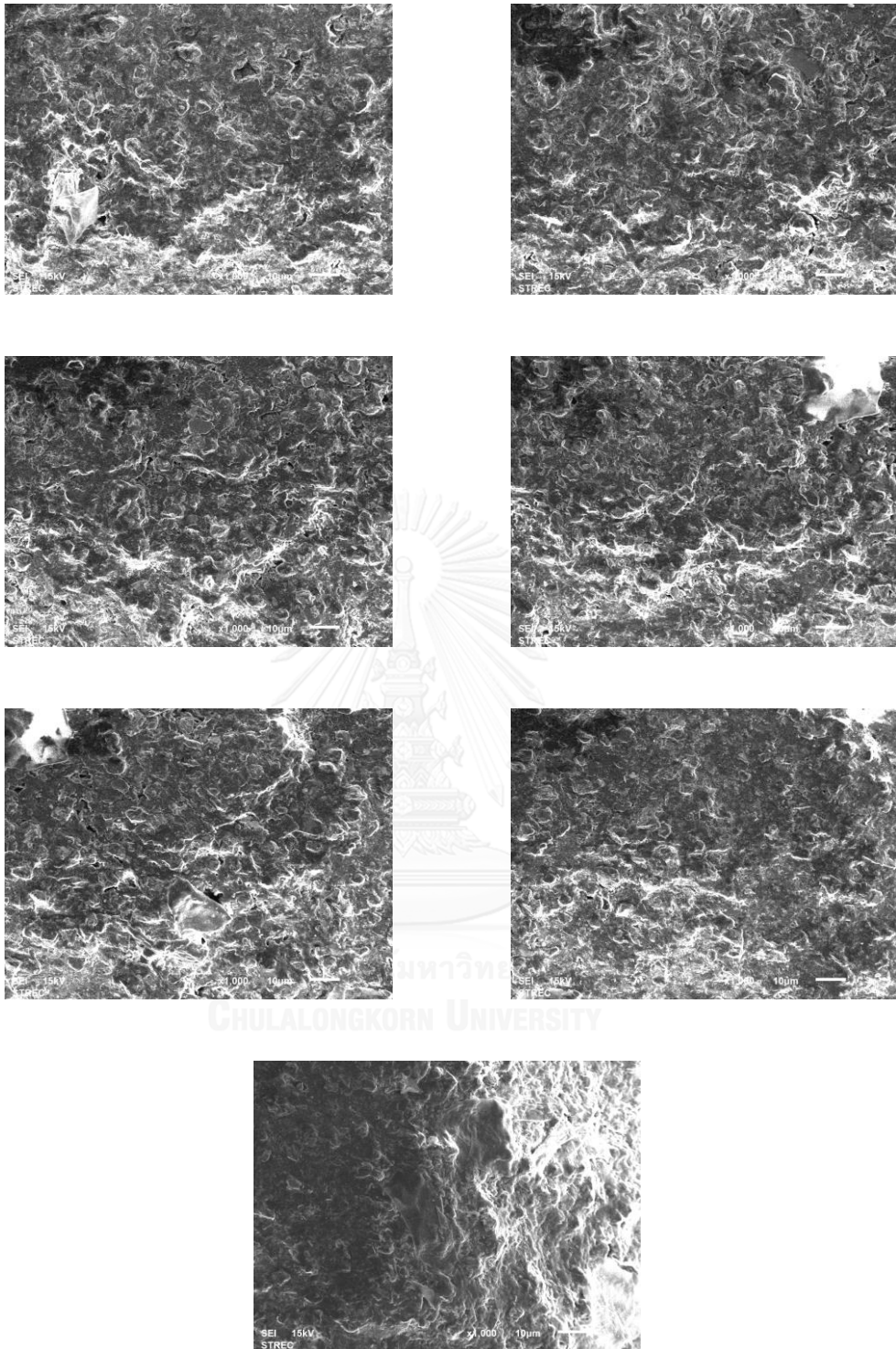
ภาพที่ ก-4 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมครั้งแรกทั้งสี่ตำแหน่ง  
ที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า



ภาพที่ ก-5 สัณฐานวิทยาของล่อเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ครั้ง  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล่อเจียรไนที่กำลังขยาย 500 เท่า

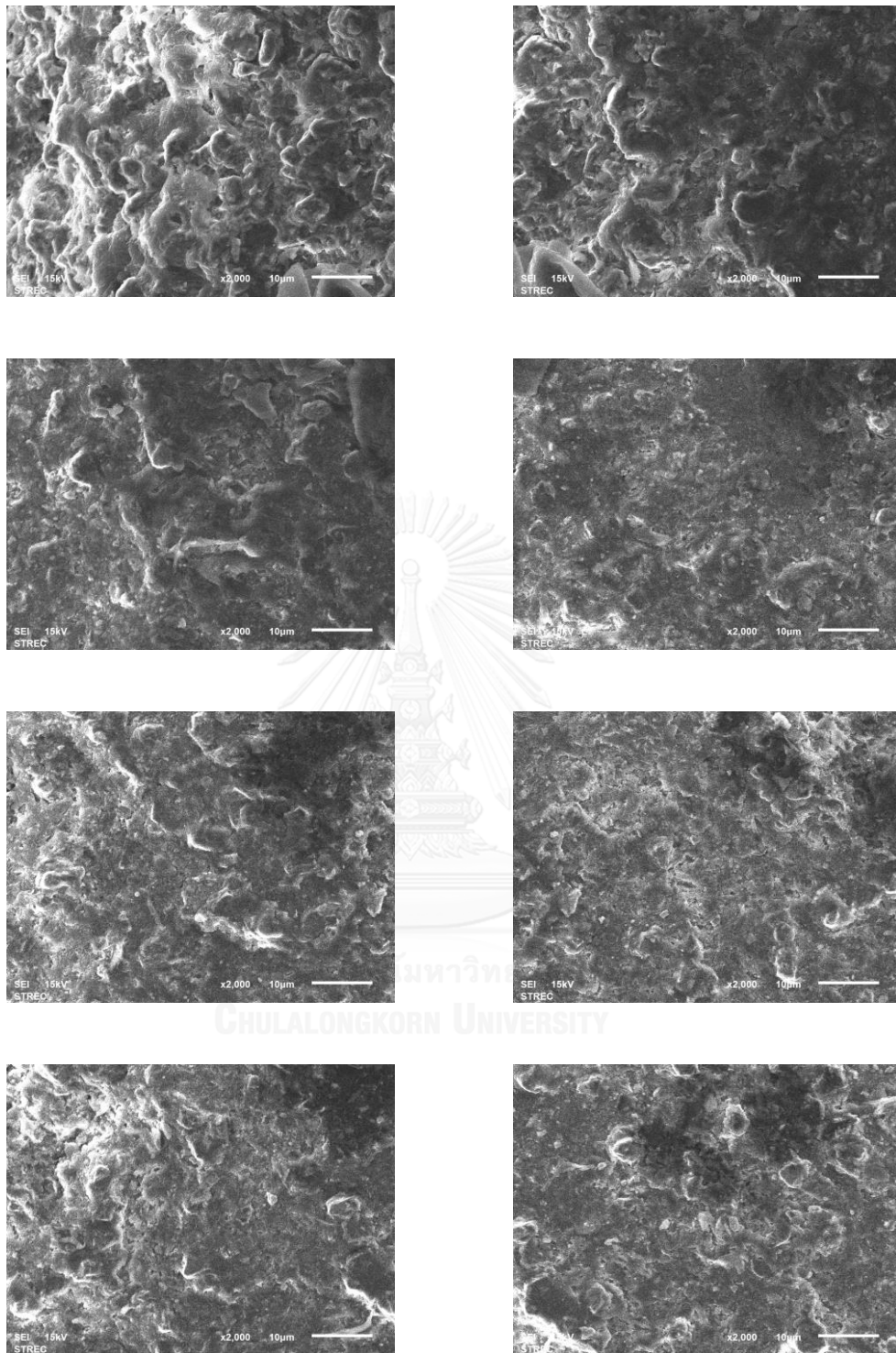


ภาพที่ ก-6 สัณฐานวิทยาของล้อยีระไนหลังใช้เยีระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยีระไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

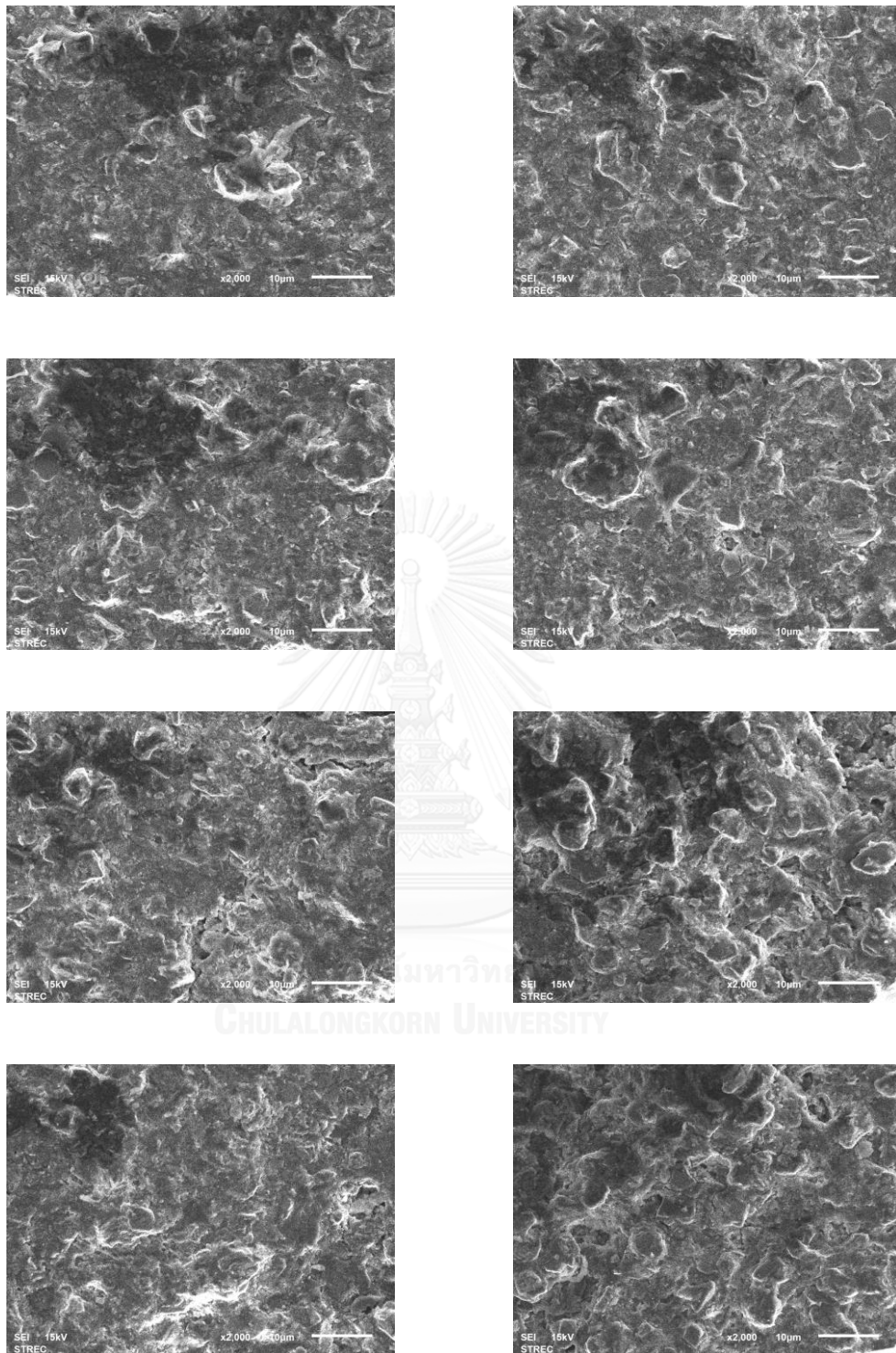


ภาพที่ ก-6 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ต่อ)

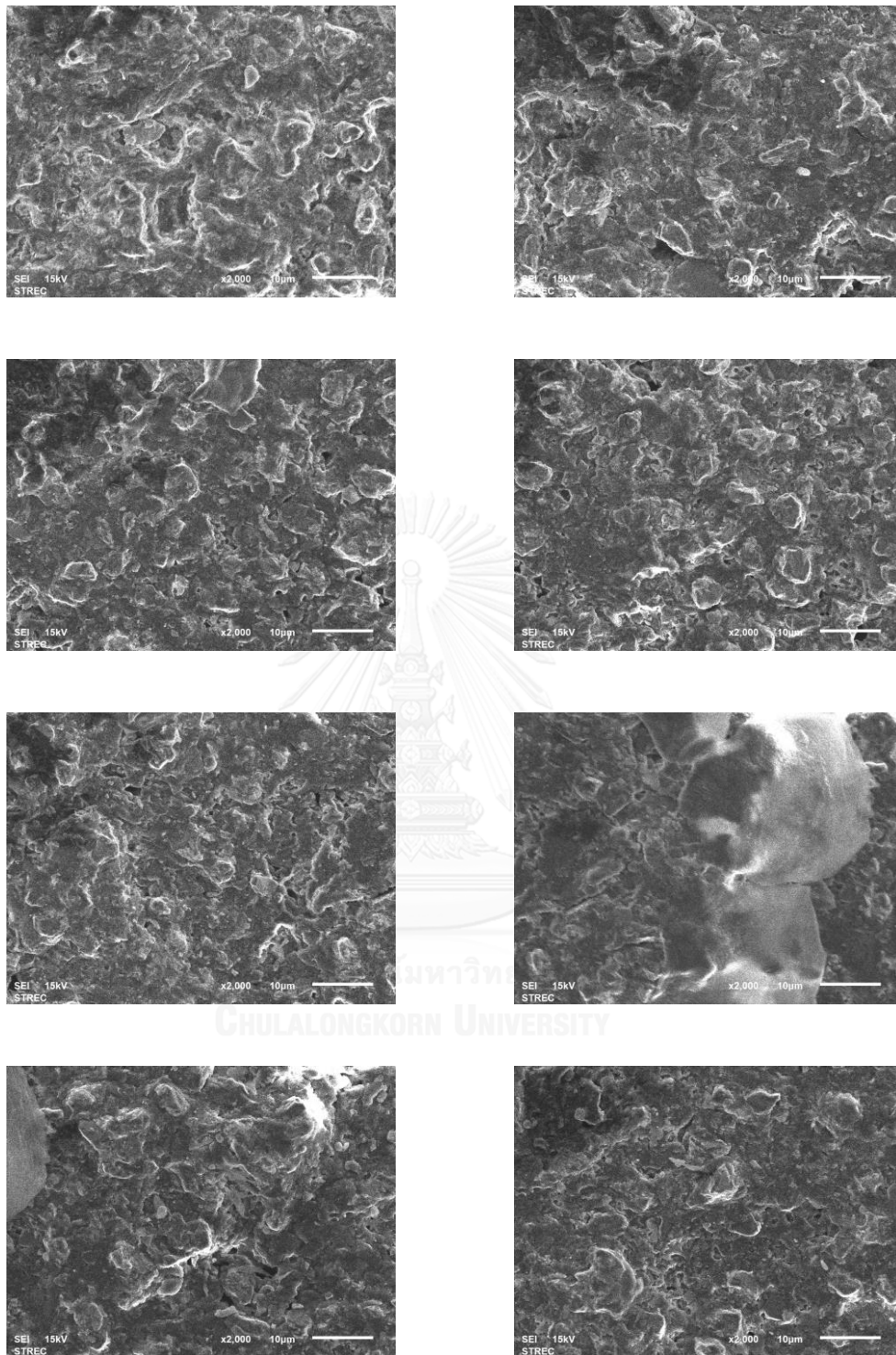




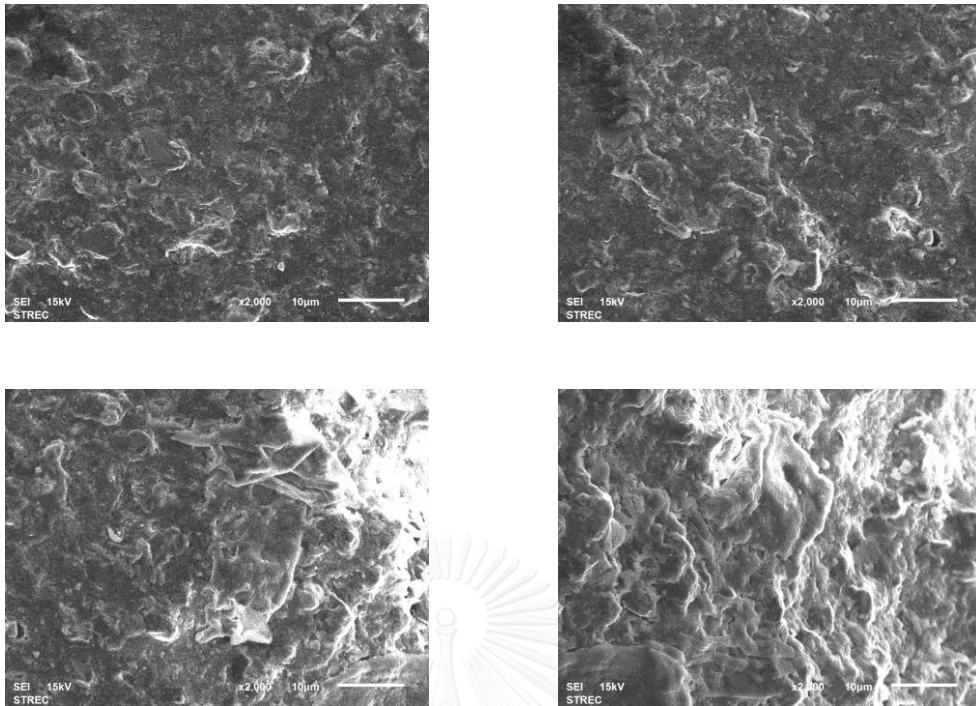
ภาพที่ ก-7 สัณฐานวิทยาของล้อยีระไนหลังใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยีระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



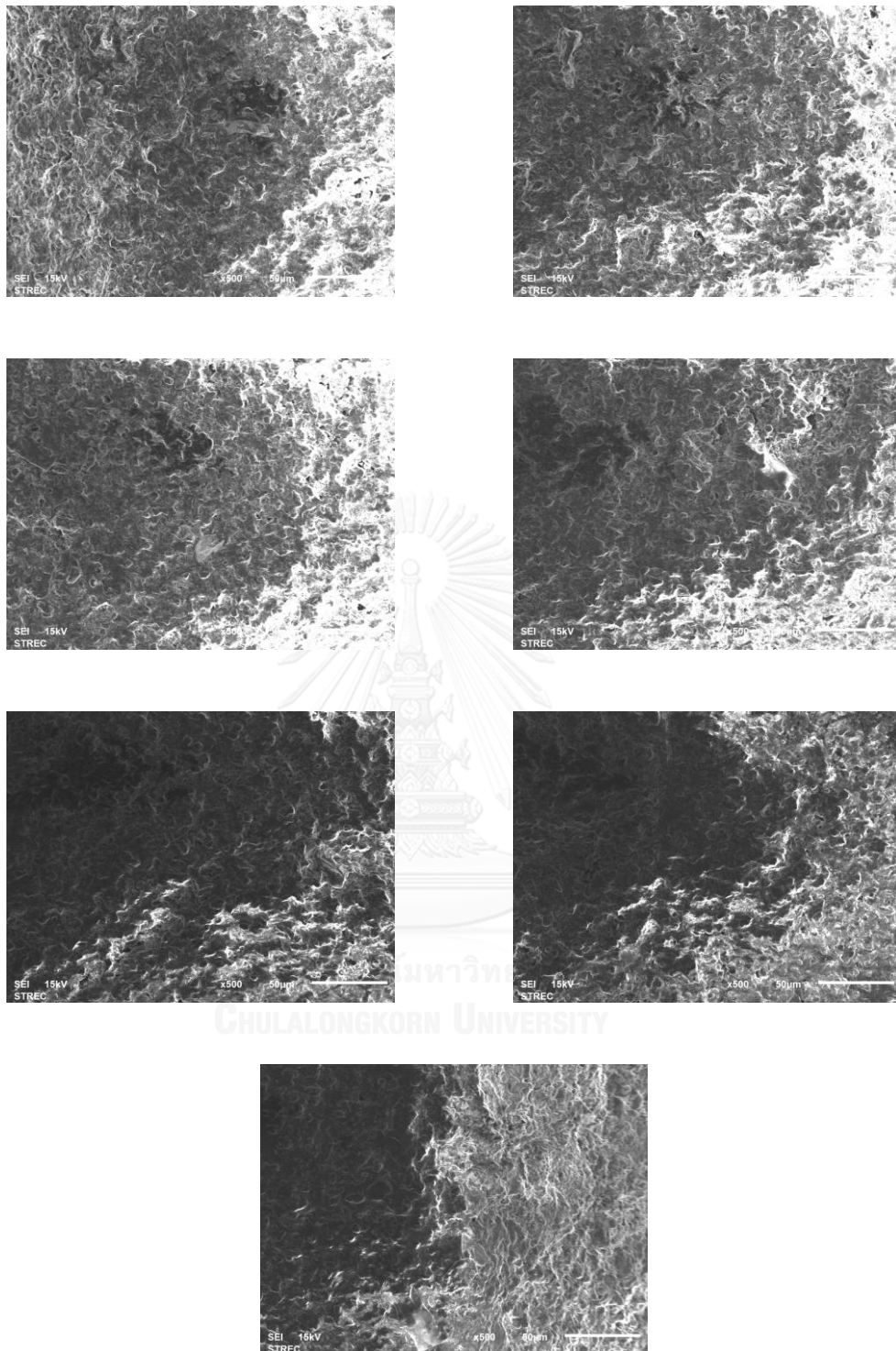
ภาพที่ ก-7 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ครั้ง  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)



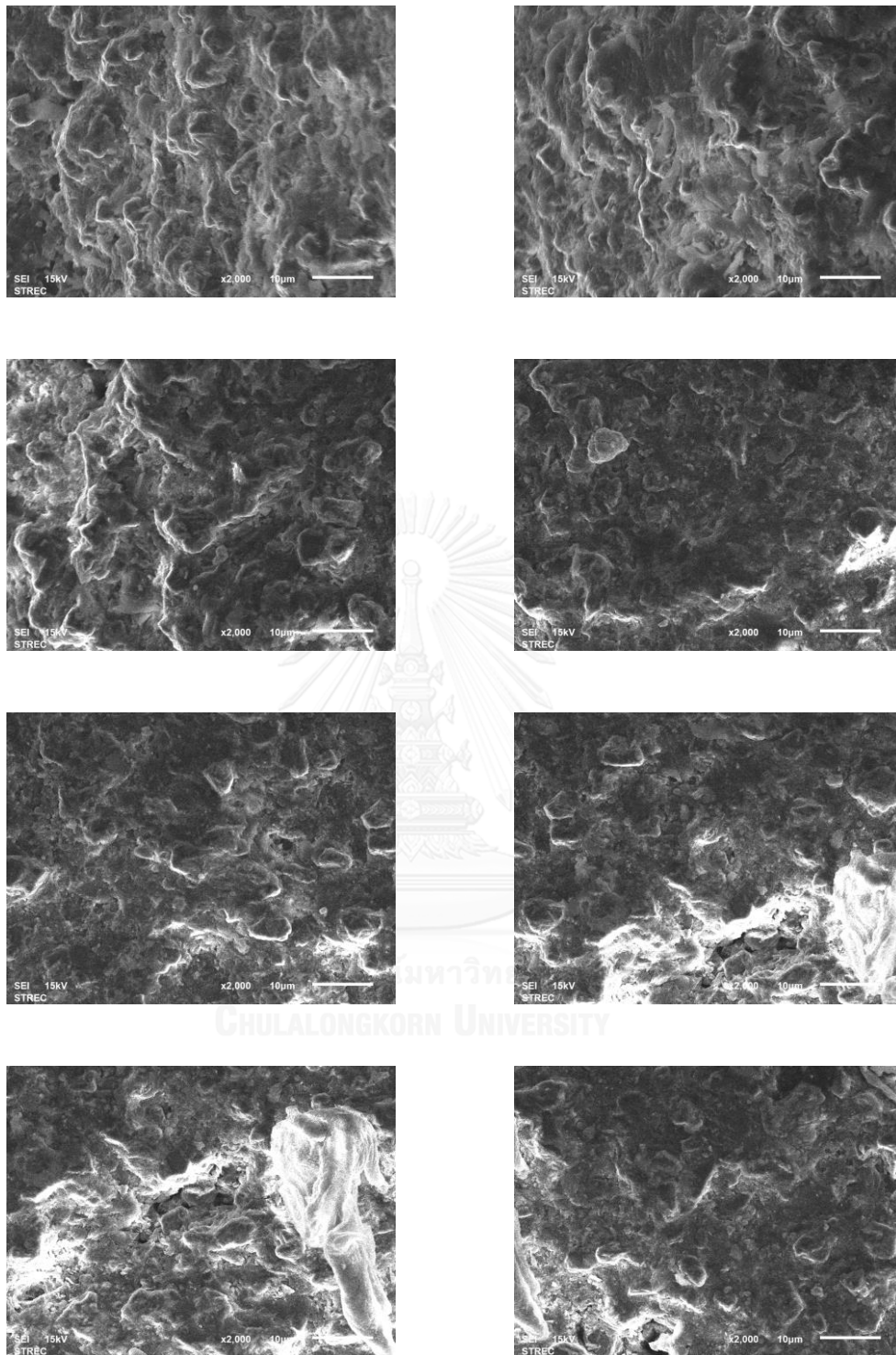
ภาพที่ ก-7 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระโนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ครั้ง  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดระโนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)



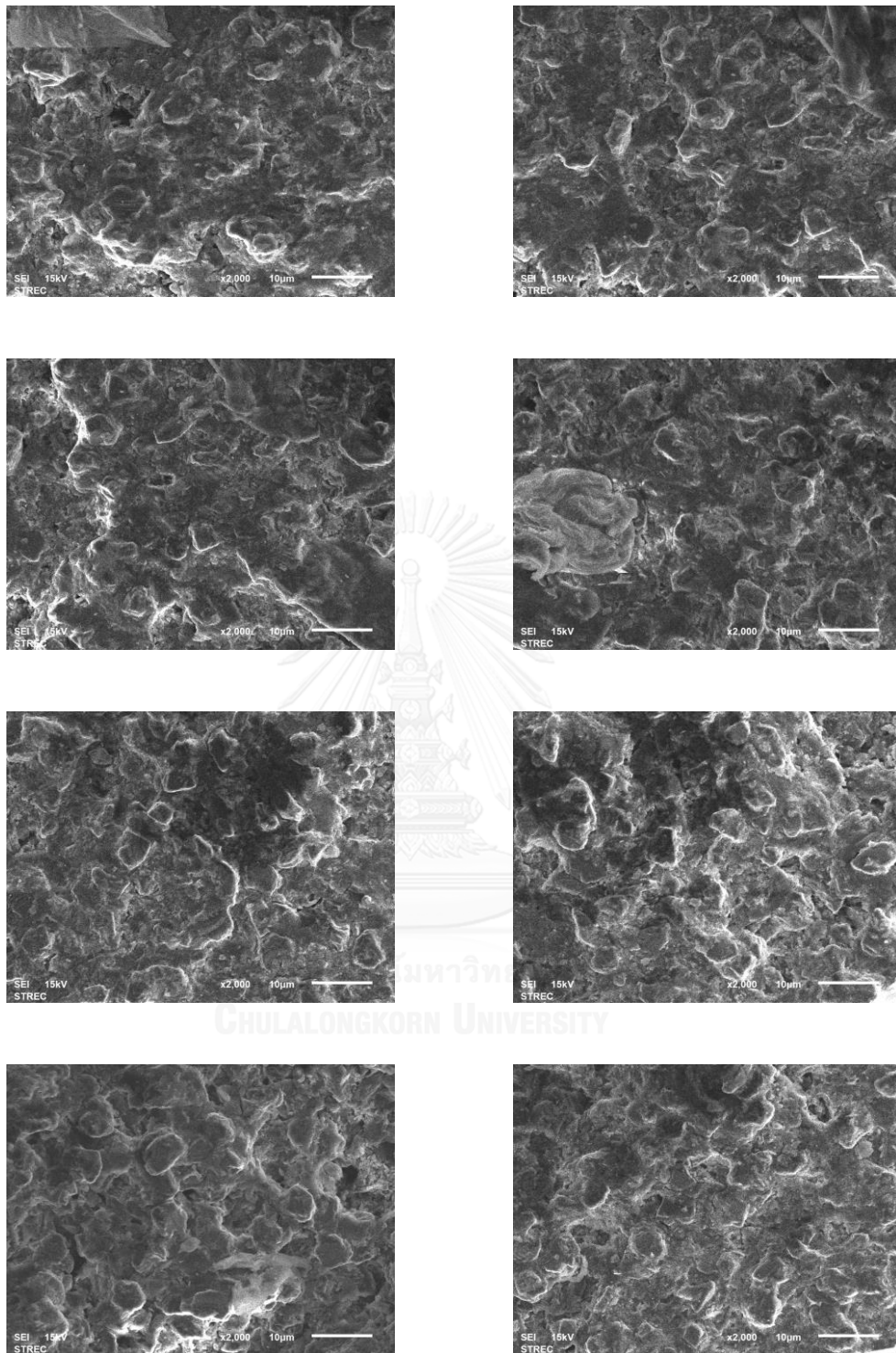
ภาพที่ ก-7 สัณฐานวิทยาของล่อเจียระไนหลังใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล่อเจียระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)



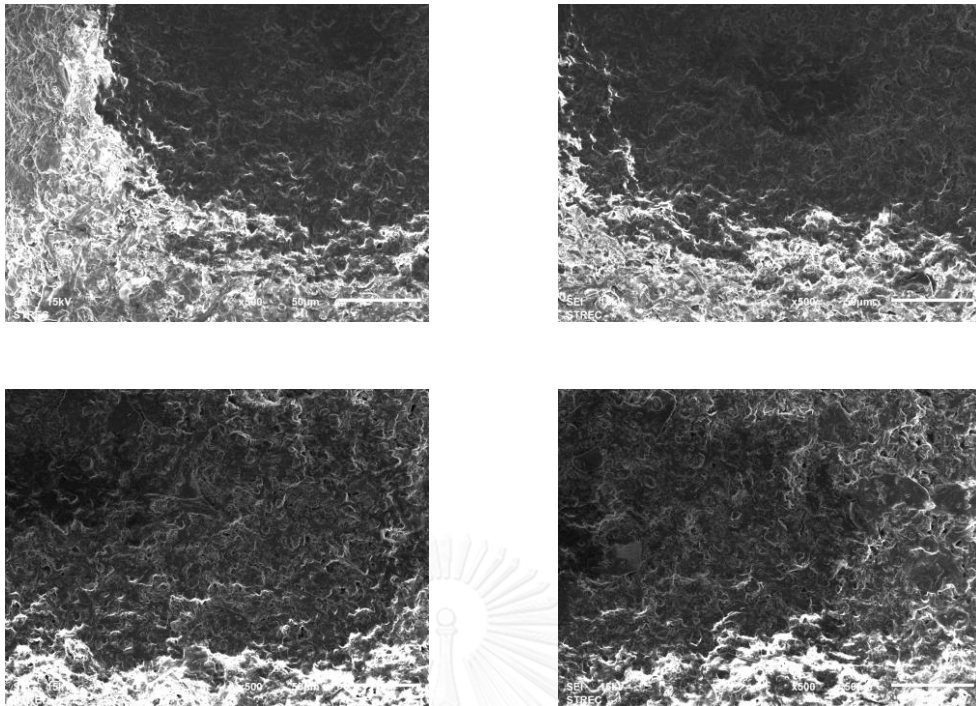
ภาพที่ ก-8 สัณฐานวิทยาของล่อเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่สองตลอดความกว้างของล่อเจียรไนที่กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ ก-9 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่สองตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

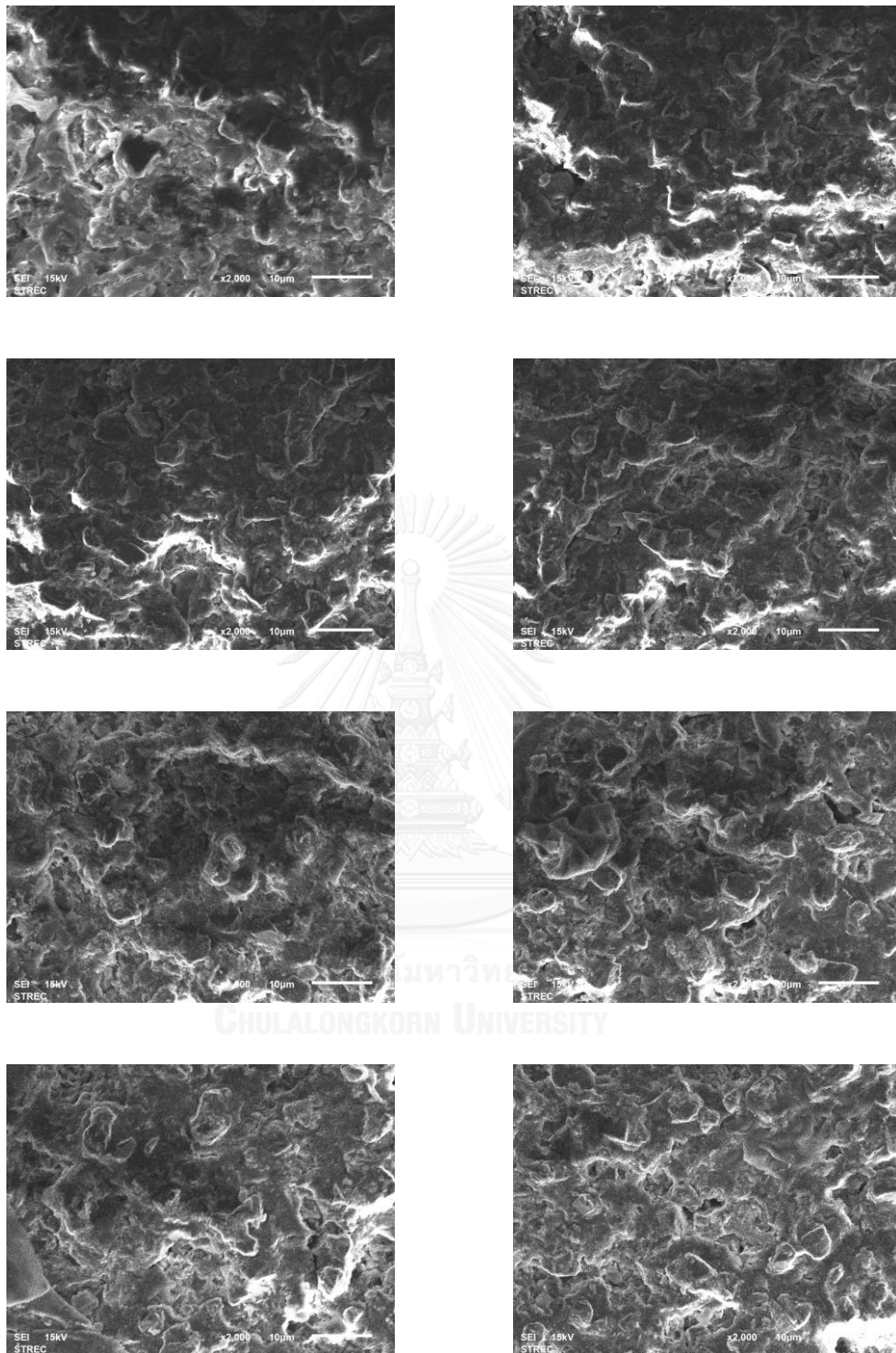


ภาพที่ ก-9 สัณฐานวิทยาของล้อยีระไนหลังใช้เยีระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่สองตลอดความกว้างของล้อยีระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

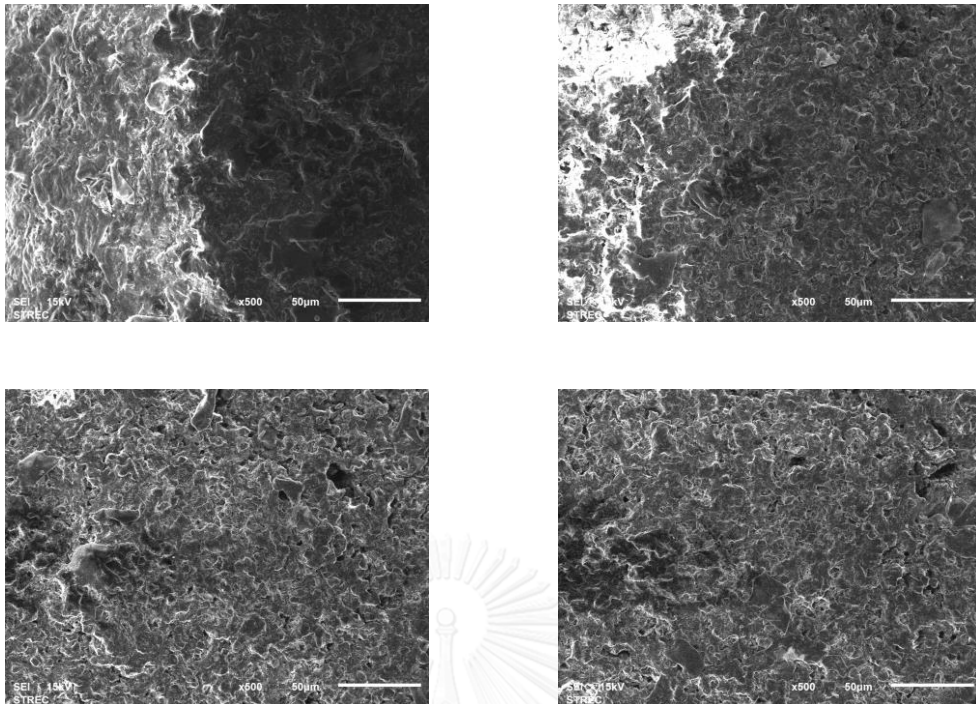


ภาพที่ ก-10 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียระไนหลังใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่สามตลอดความกว้างของล้อยเจียระไนที่กำลังขยาย 500 เท่า

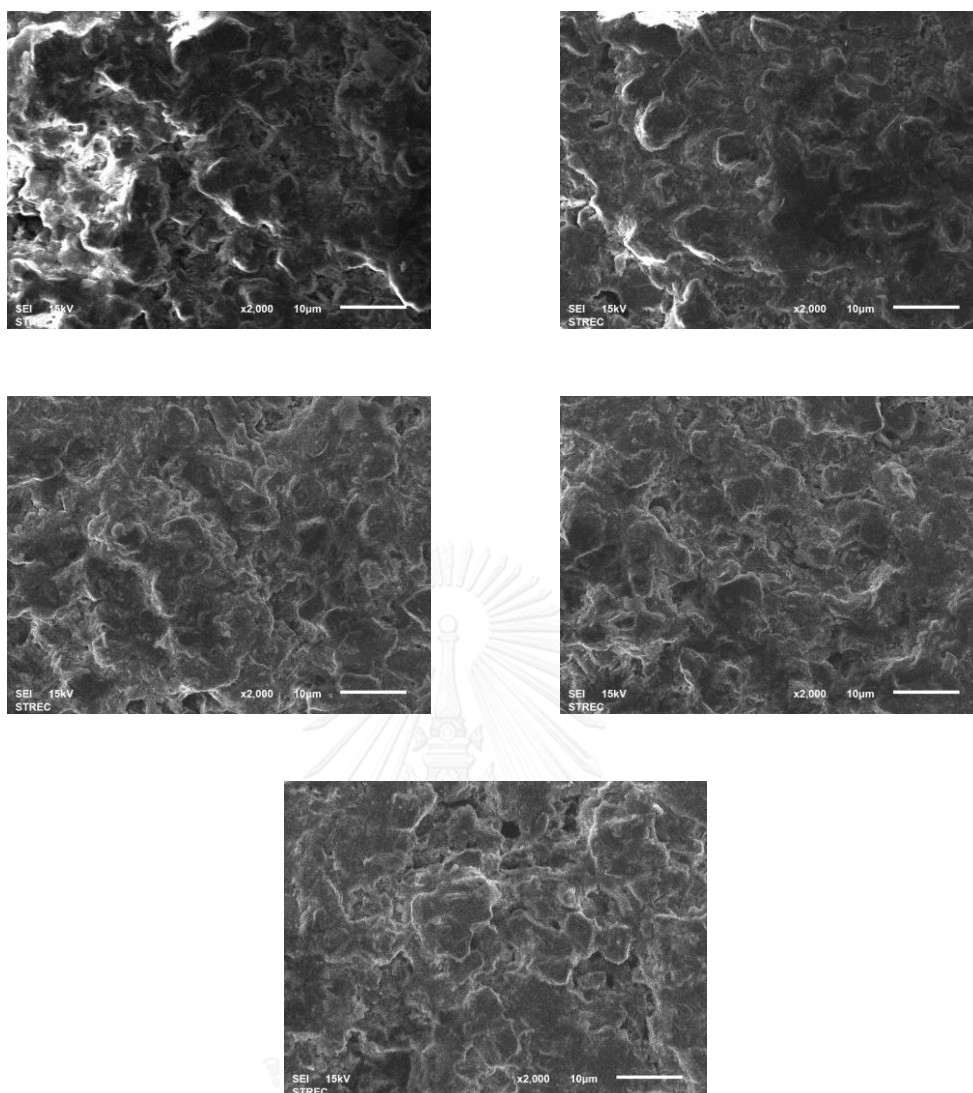




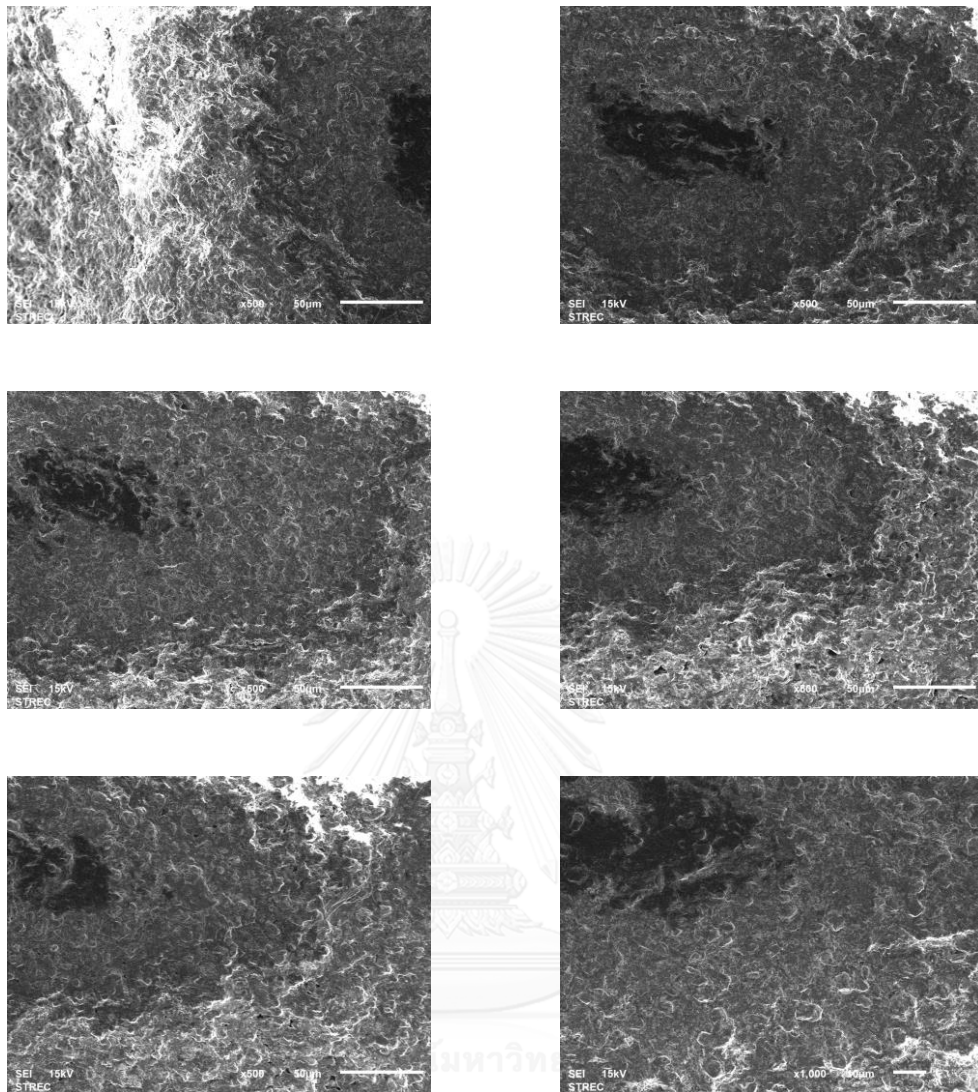
ภาพที่ ก-11 สัณฐานวิทยาของล่อเจียระไนหลังใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่สามตลอดความกว้างของล่อเจียระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



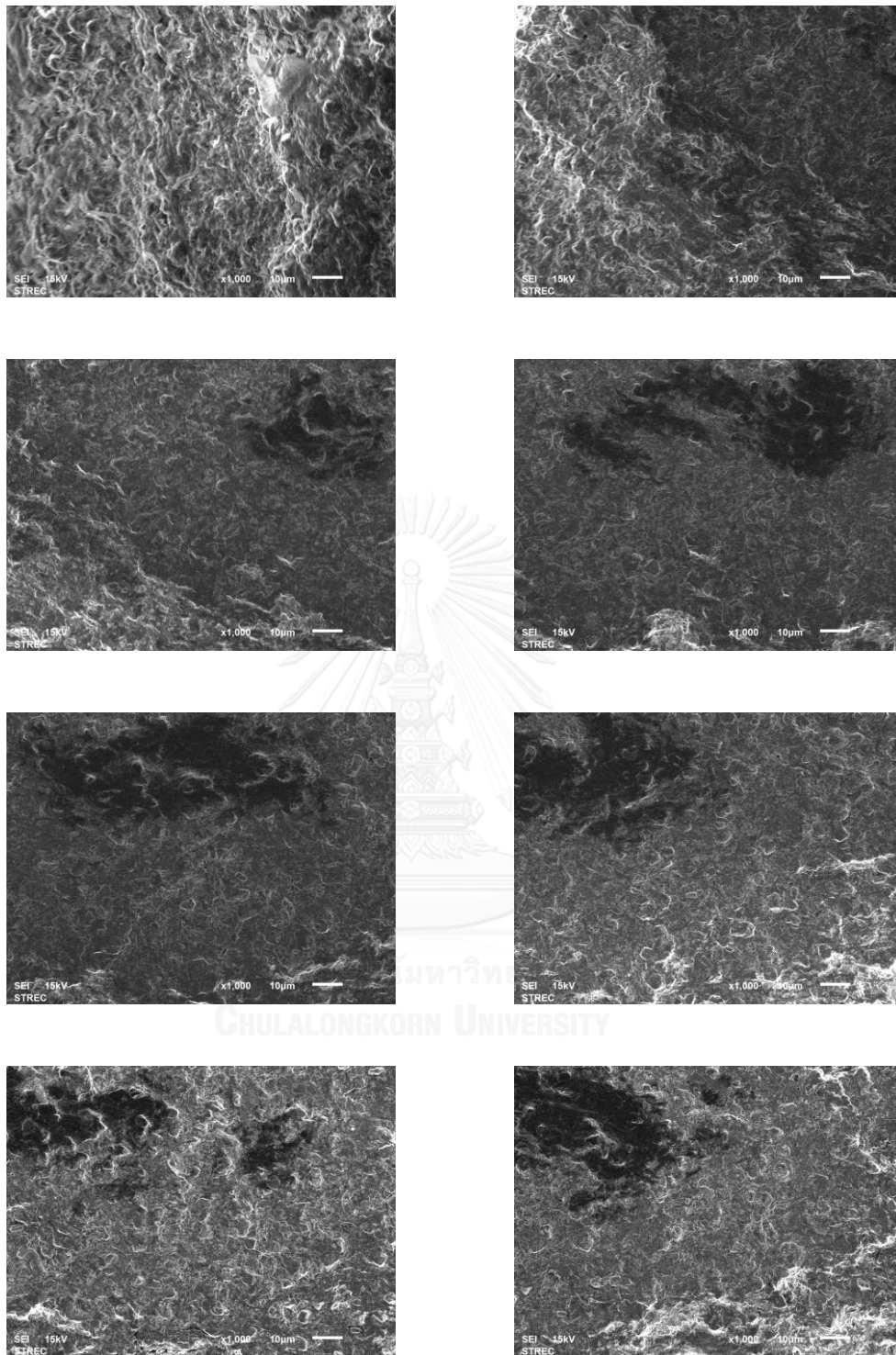
ภาพที่ ก-12 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียระไนหลังใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น  
ตำแหน่งที่สี่ตลอดความกว้างของล้อยเจียระไนที่กำลังขยาย 500 เท่า



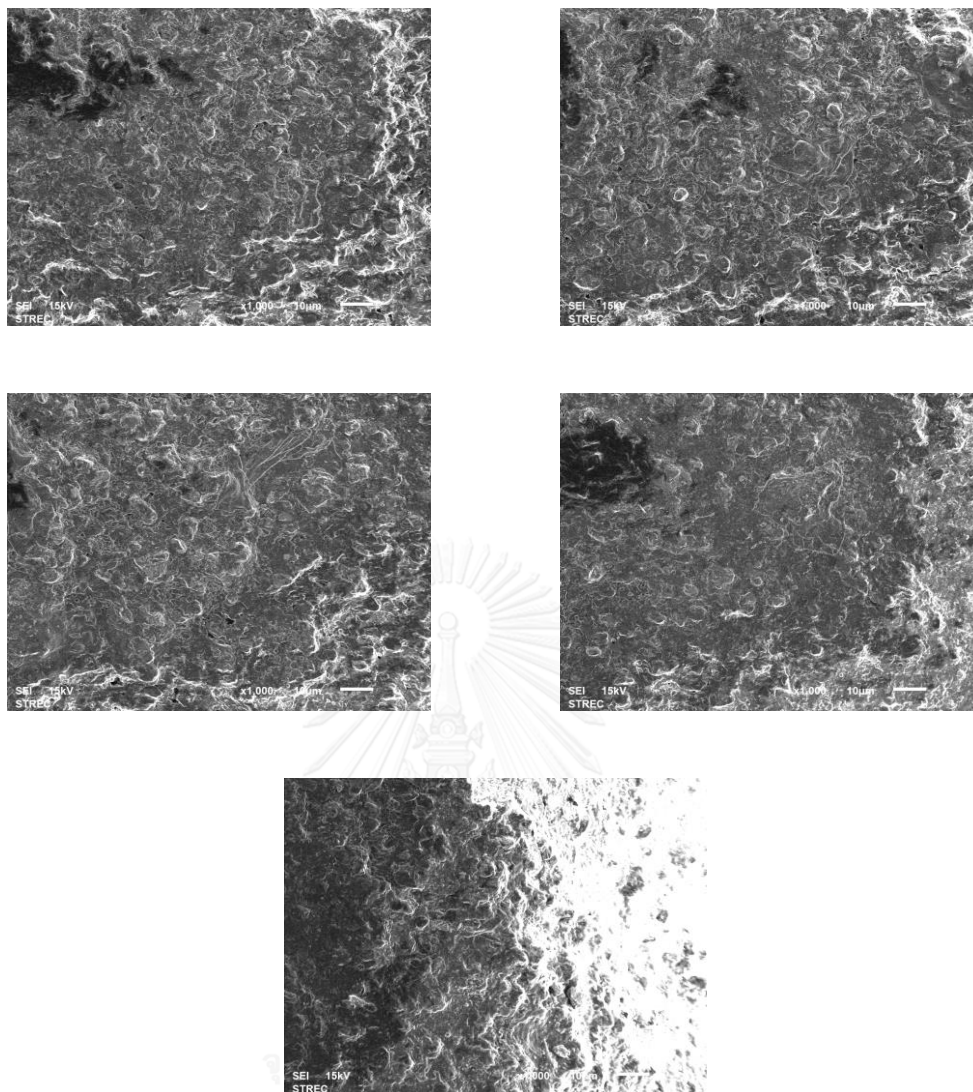
ภาพที่ ก-13 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั่วโมง  
ตำแหน่งที่สีตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



ภาพที่ ก-14 สัณฐานวิทยาของล่อเจียระไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล่อเจียระไนที่กำลังขยาย 500 เท่า



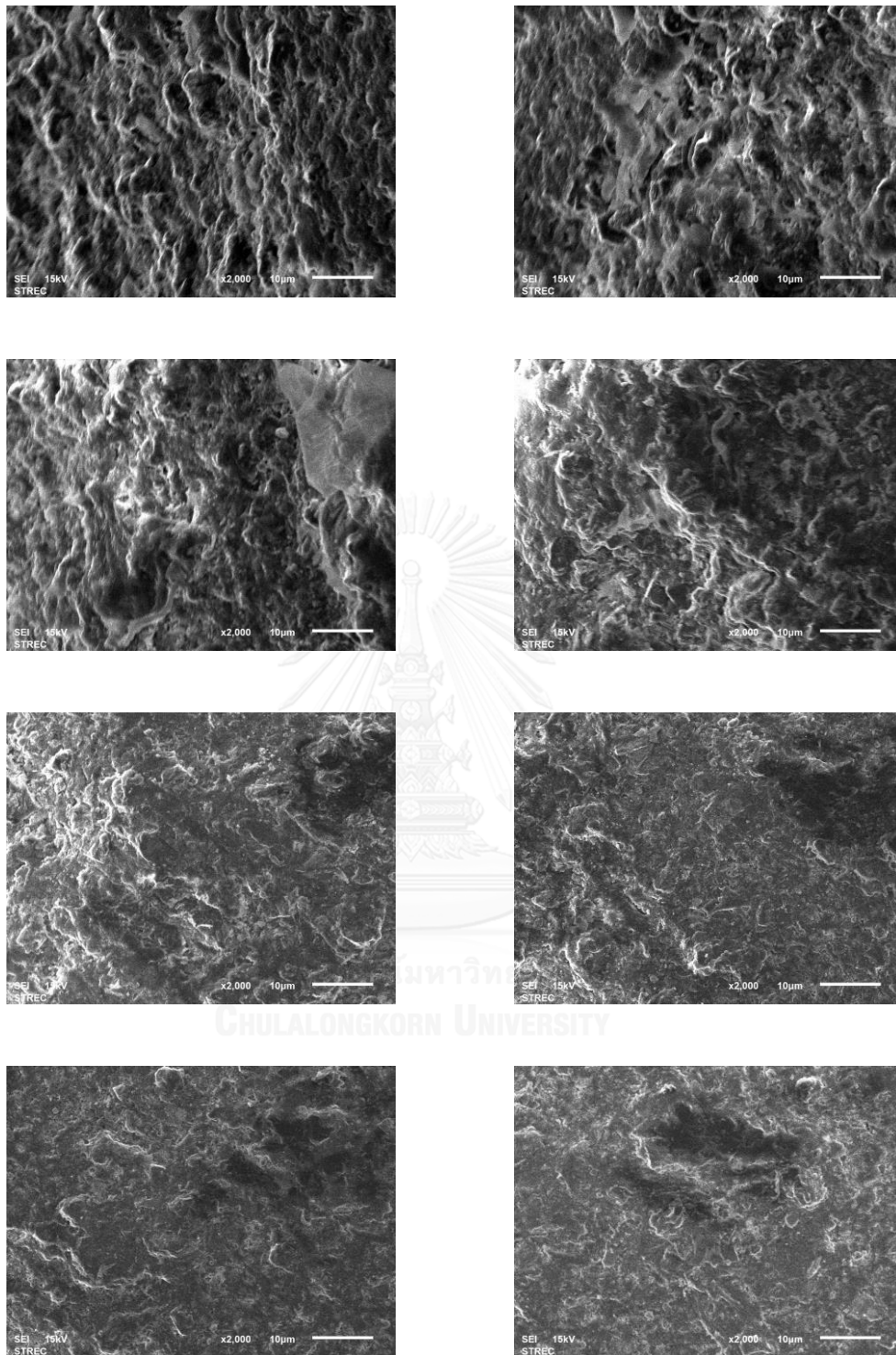
ภาพที่ ก-15 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซีน ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



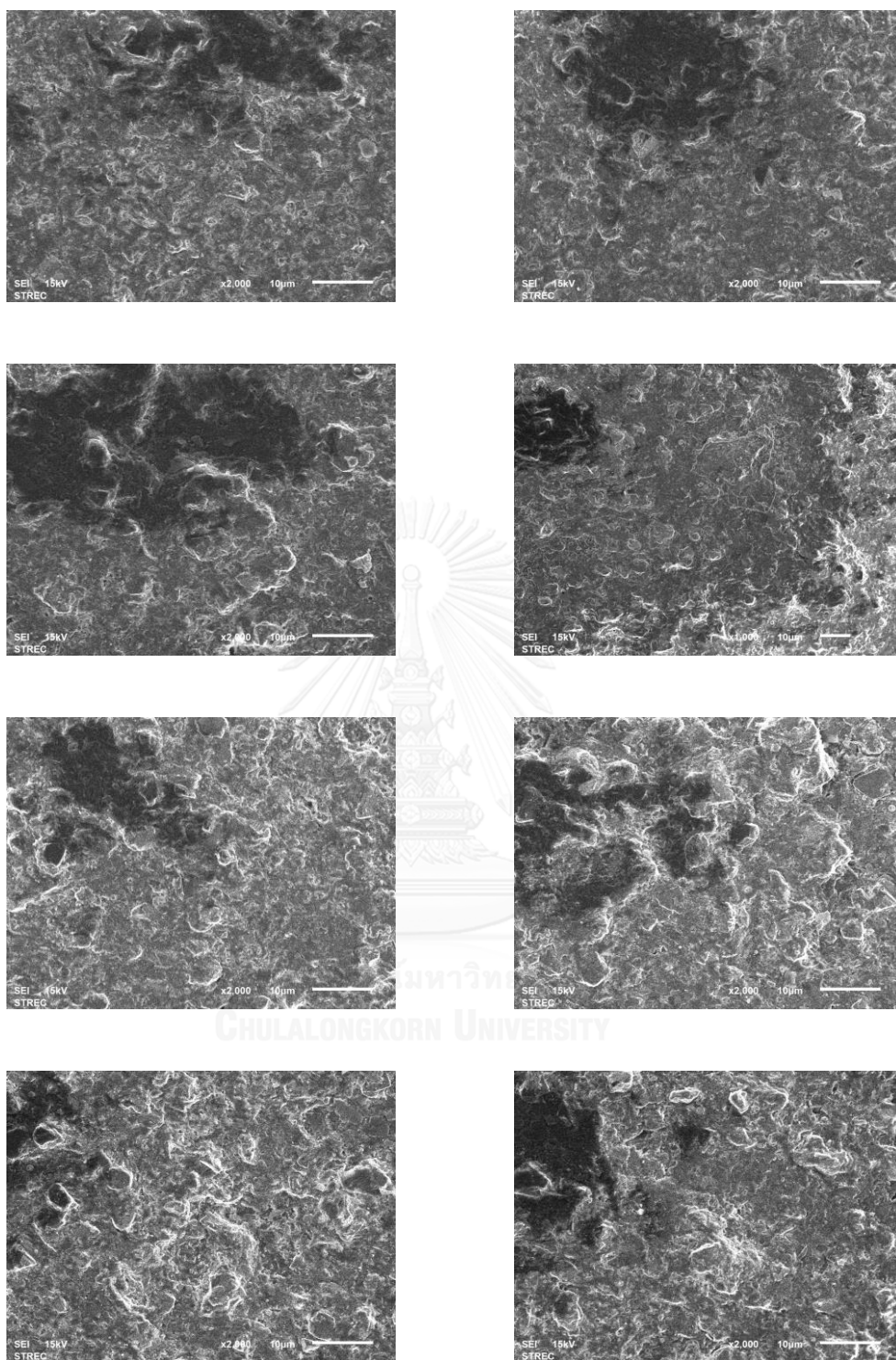
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาพที่ ก-15 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซึ้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

(ต่อ)

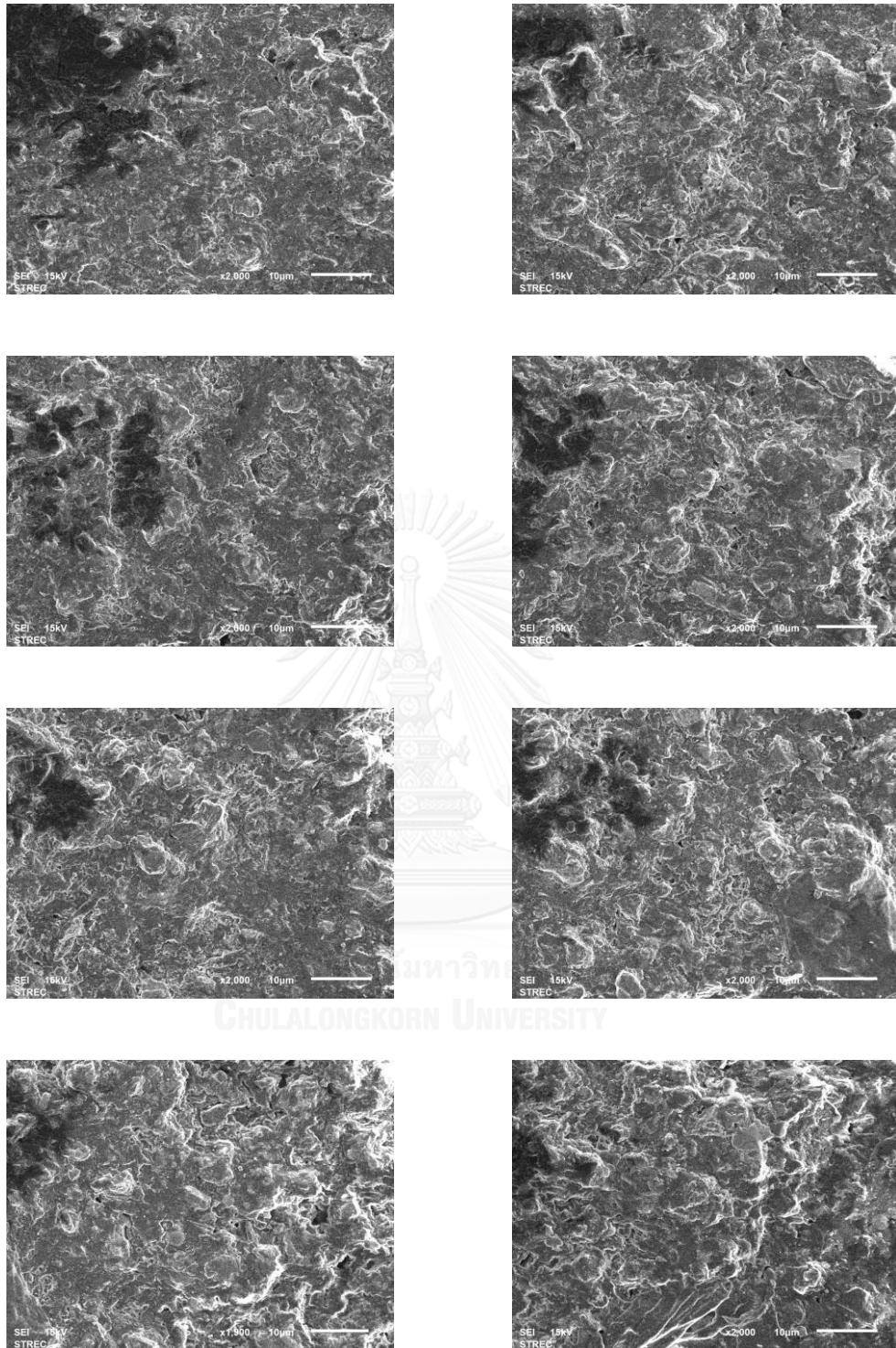


ภาพที่ ก-16 สัณฐานวิทยาของล่อเจียระไนหลังล้มคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล่อเจียระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

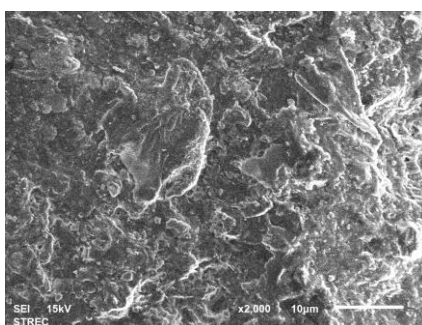
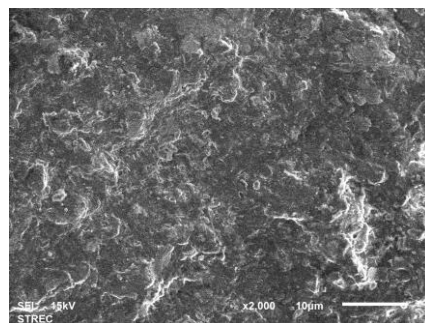
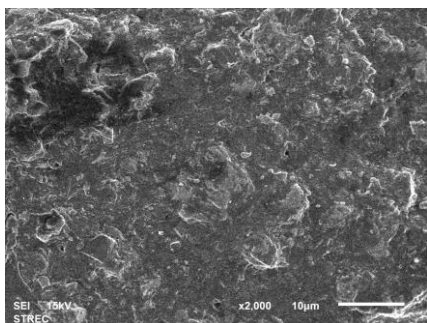


ภาพที่ ก-16 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซีน ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)



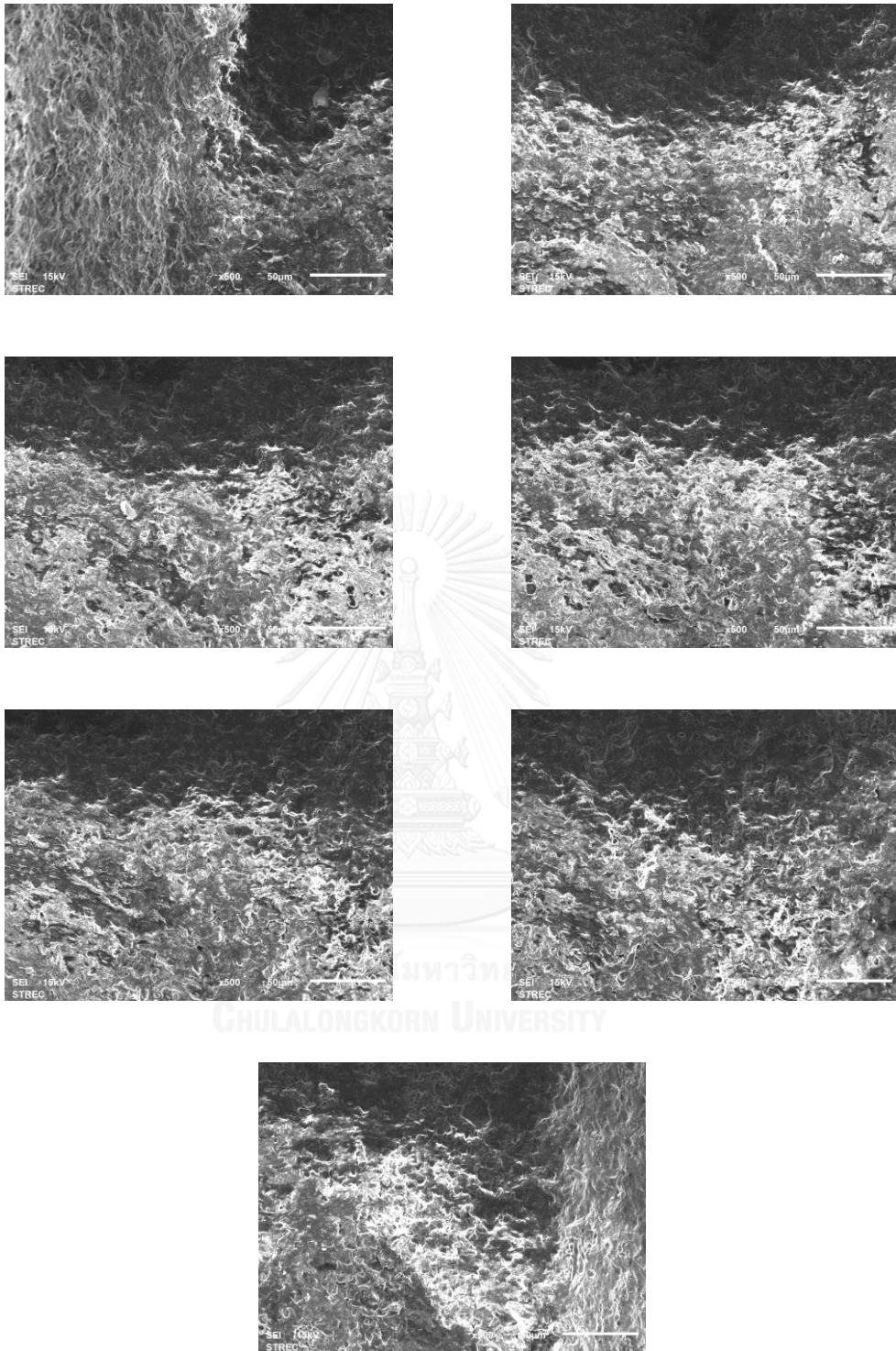


ภาพที่ ก-16 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ซีน ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

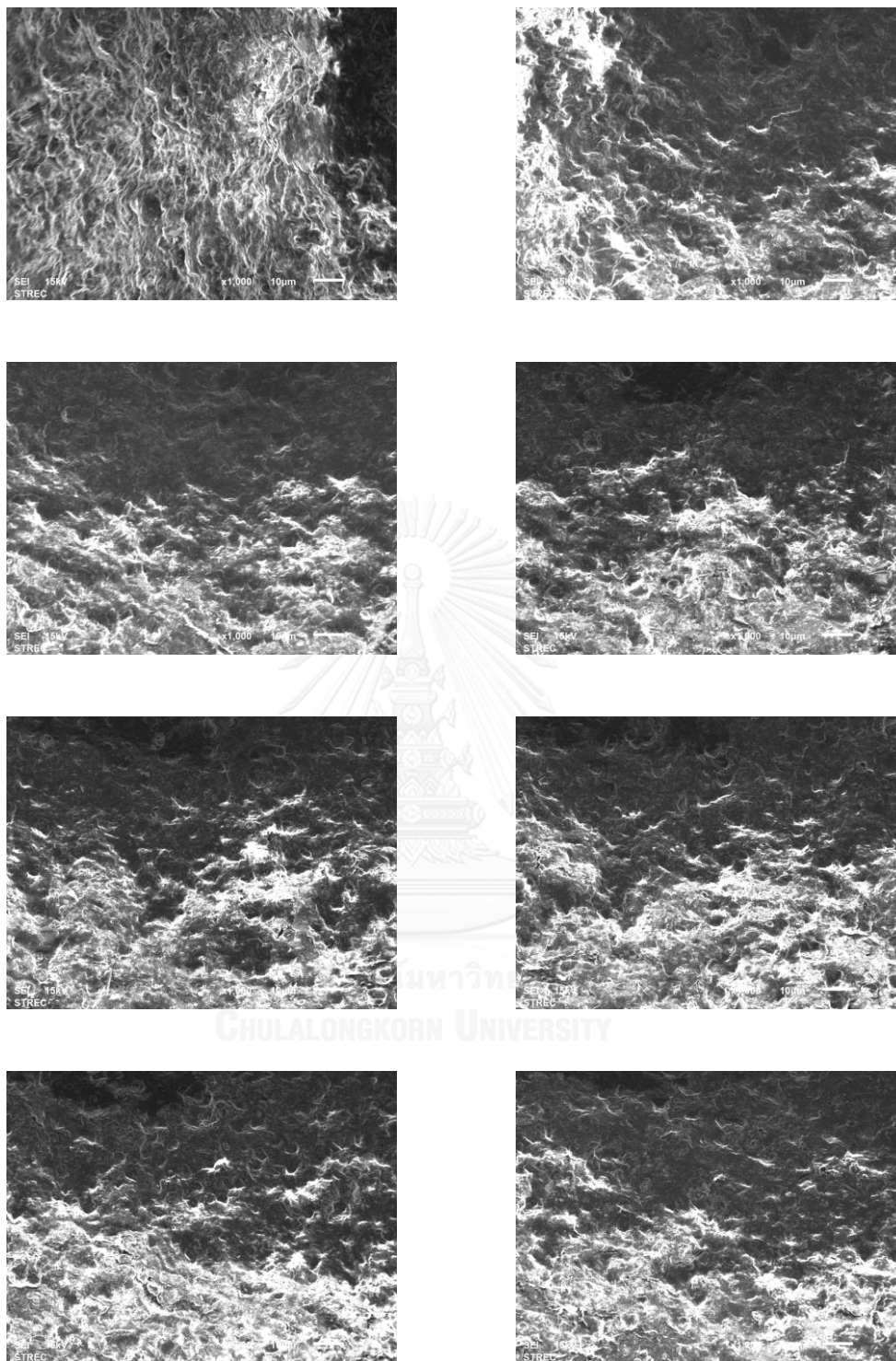


ภาพที่ ก-16 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

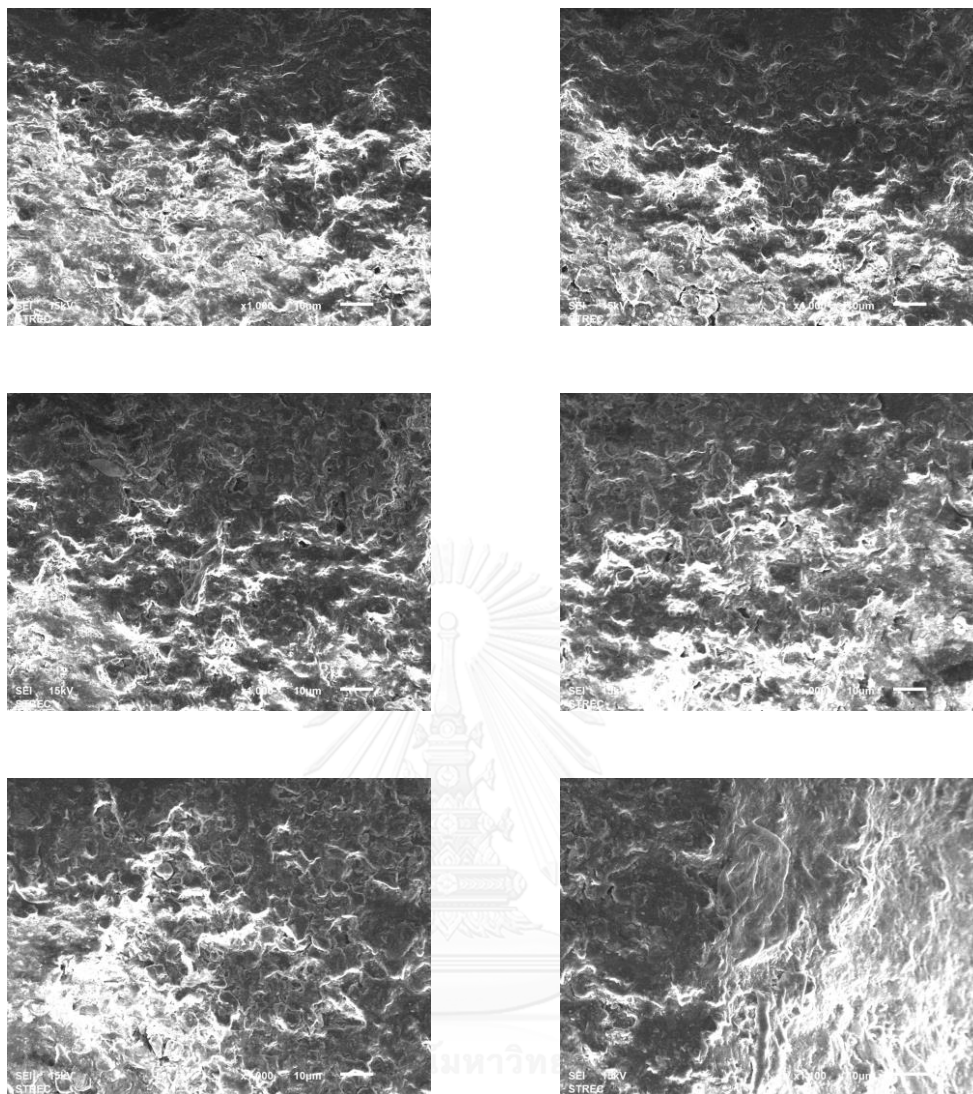
(ต่อ)



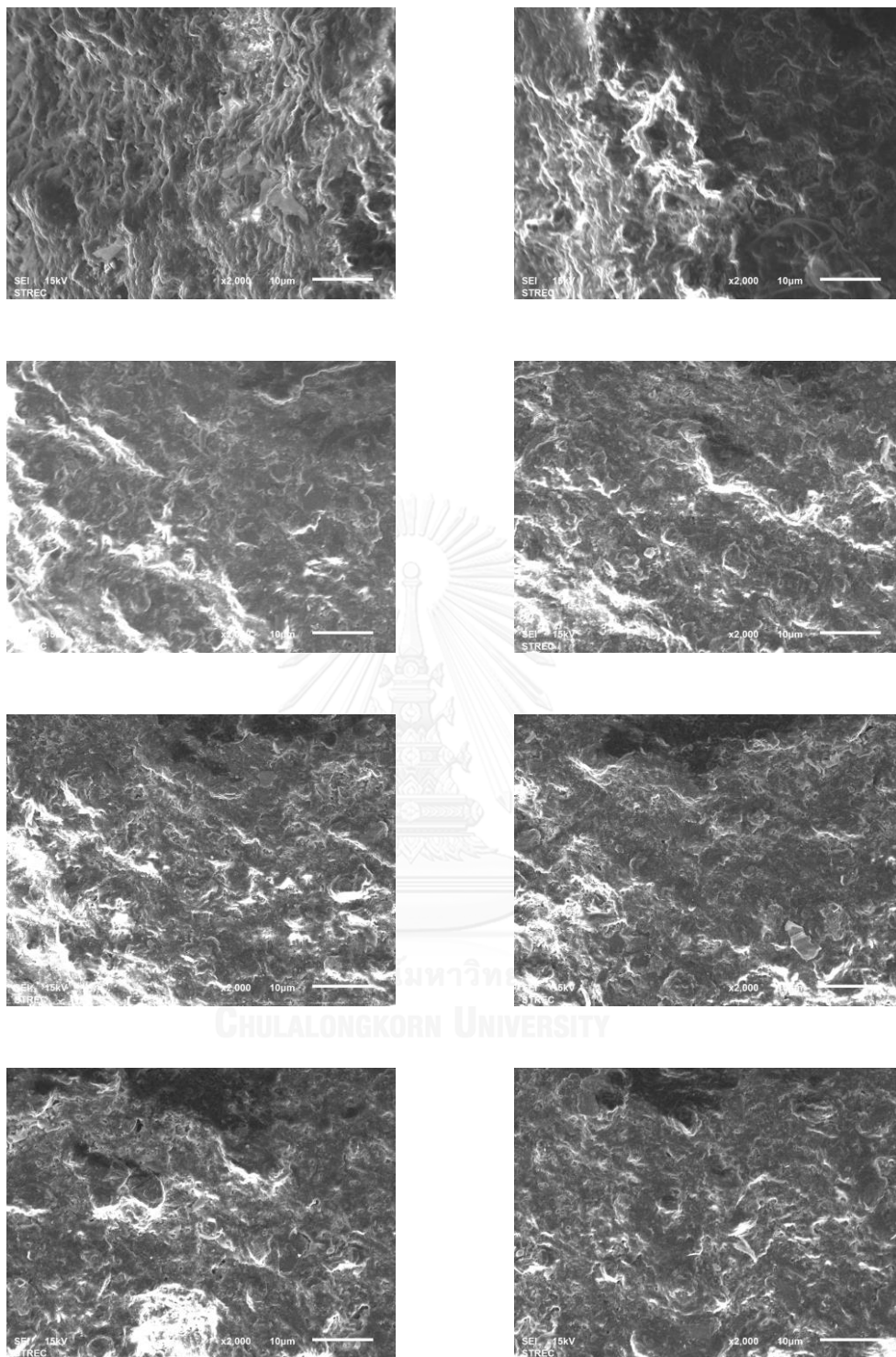
ภาพที่ ก-17 สัณฐานวิทยาของล่อเจียรไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล่อเจียรไนที่กำลังขยาย 500 เท่า



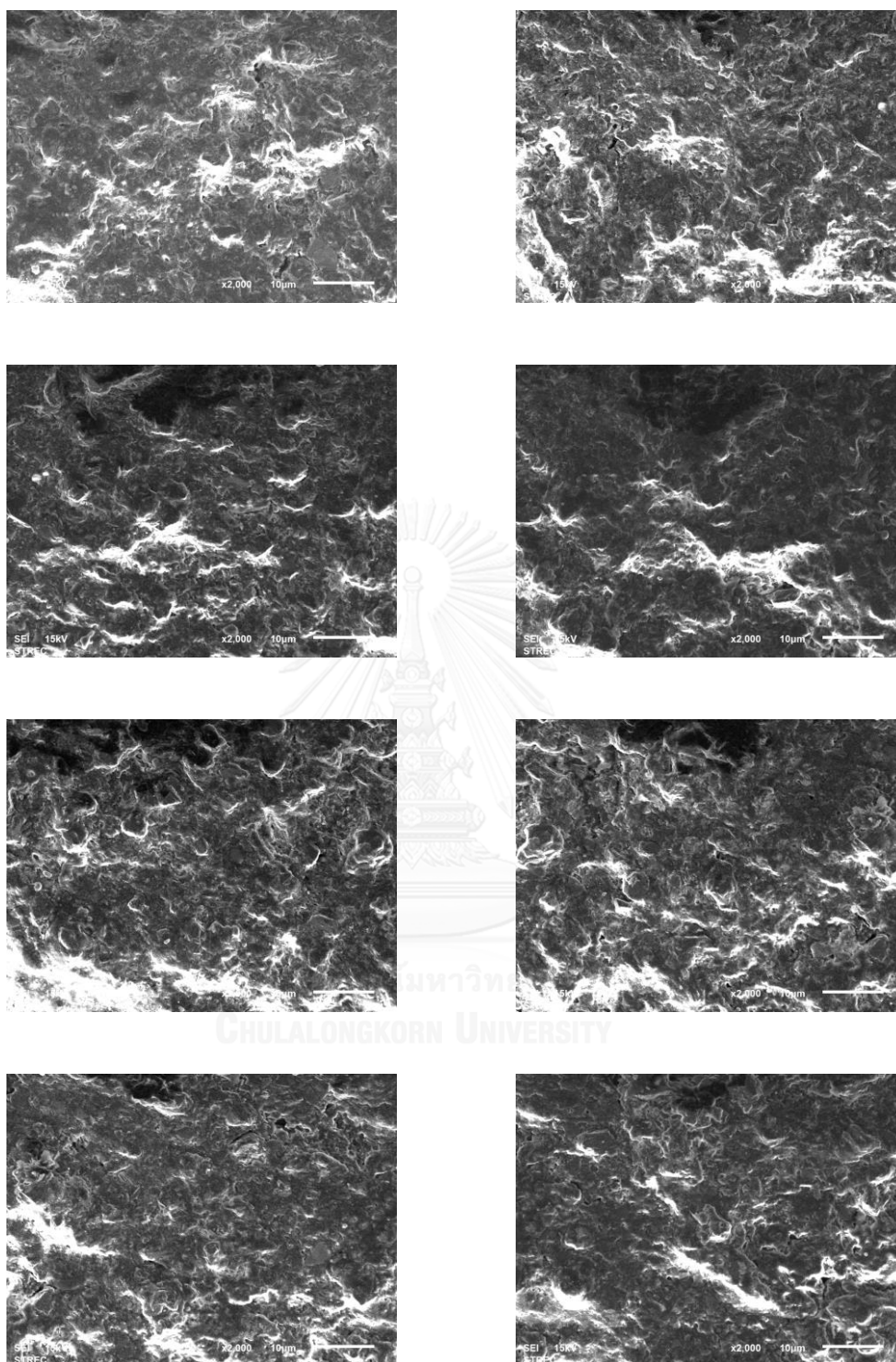
ภาพที่ ก-18 สัณฐานวิทยาของล่อเจียระไนหลังใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล่อเจียระไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



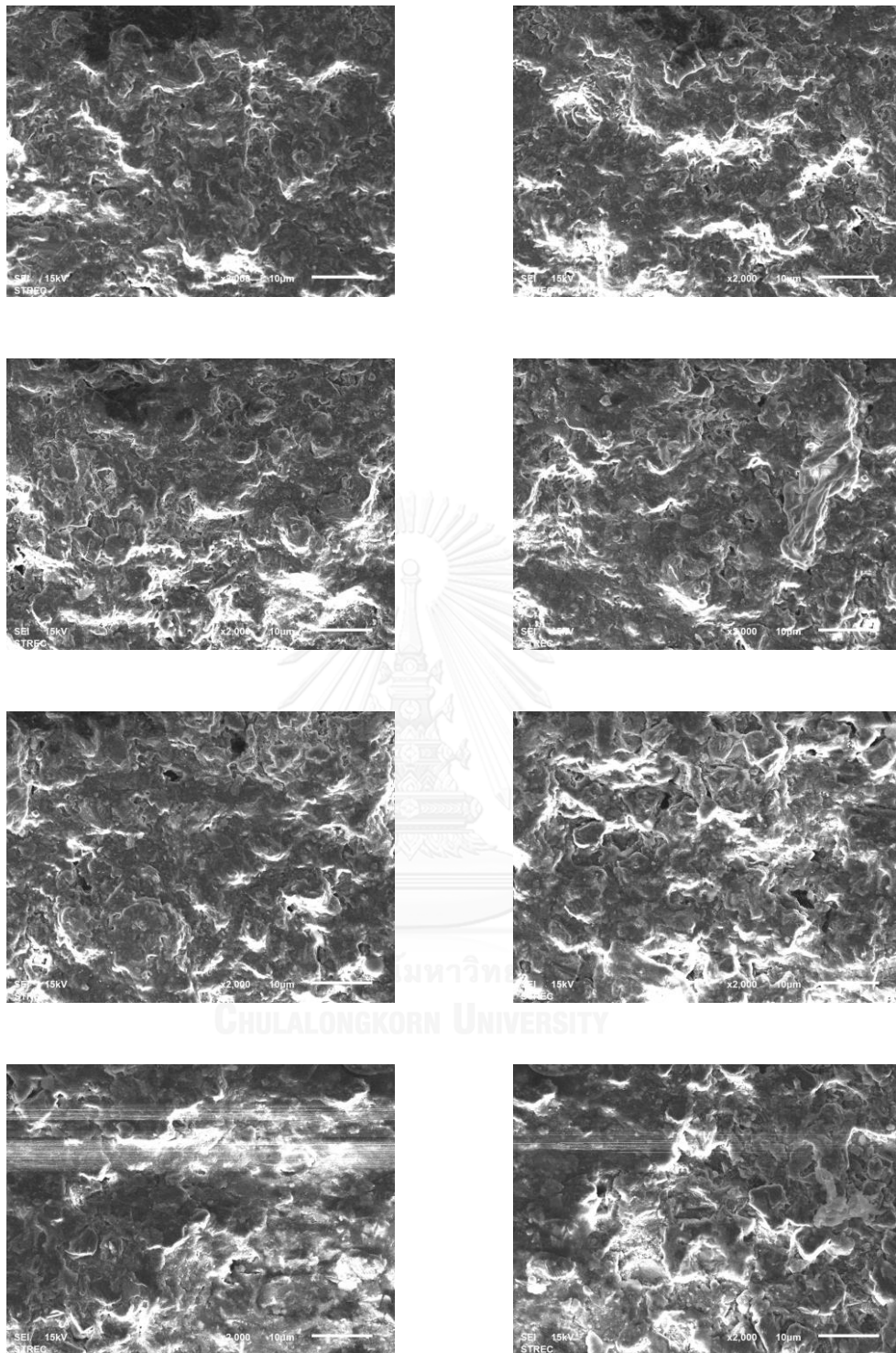
ภาพที่ ก-18 สัณฐานวิทยาของลื้อเจียรระไนหลังใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของลื้อเจียรระไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ต่อ)



ภาพที่ ก-19 สัณฐานวิทยาของล้อยีระไนหลังใช้เยีระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยีระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

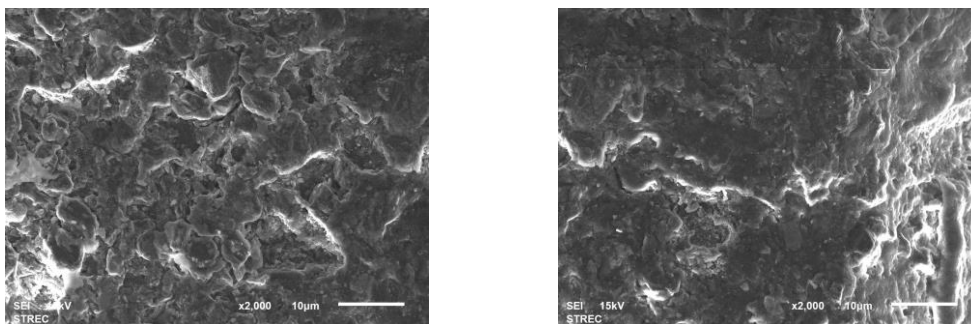


ภาพที่ ก-19 สัณฐานวิทยาของล้อยีระไนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยีระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

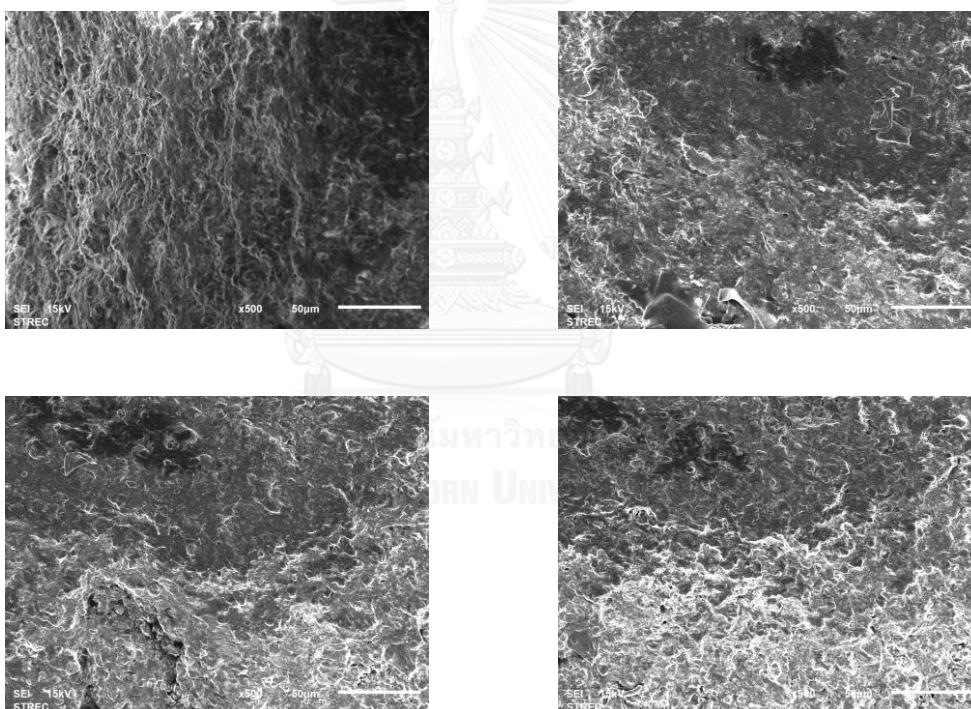


ภาพที่ ก-19 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระโนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดระโนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

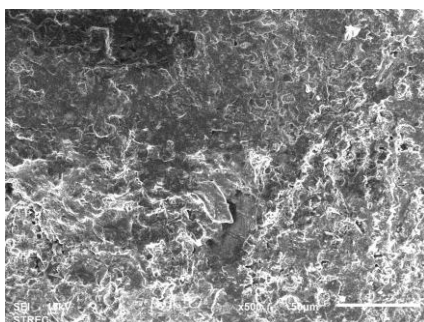
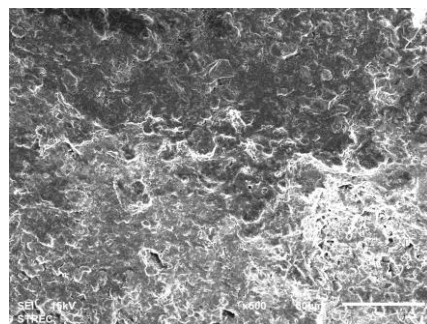
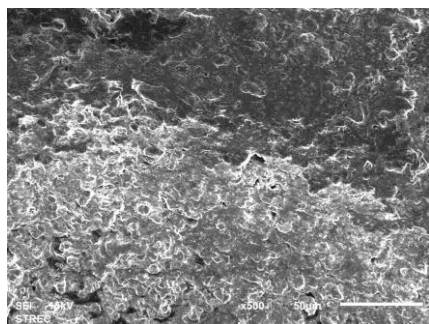




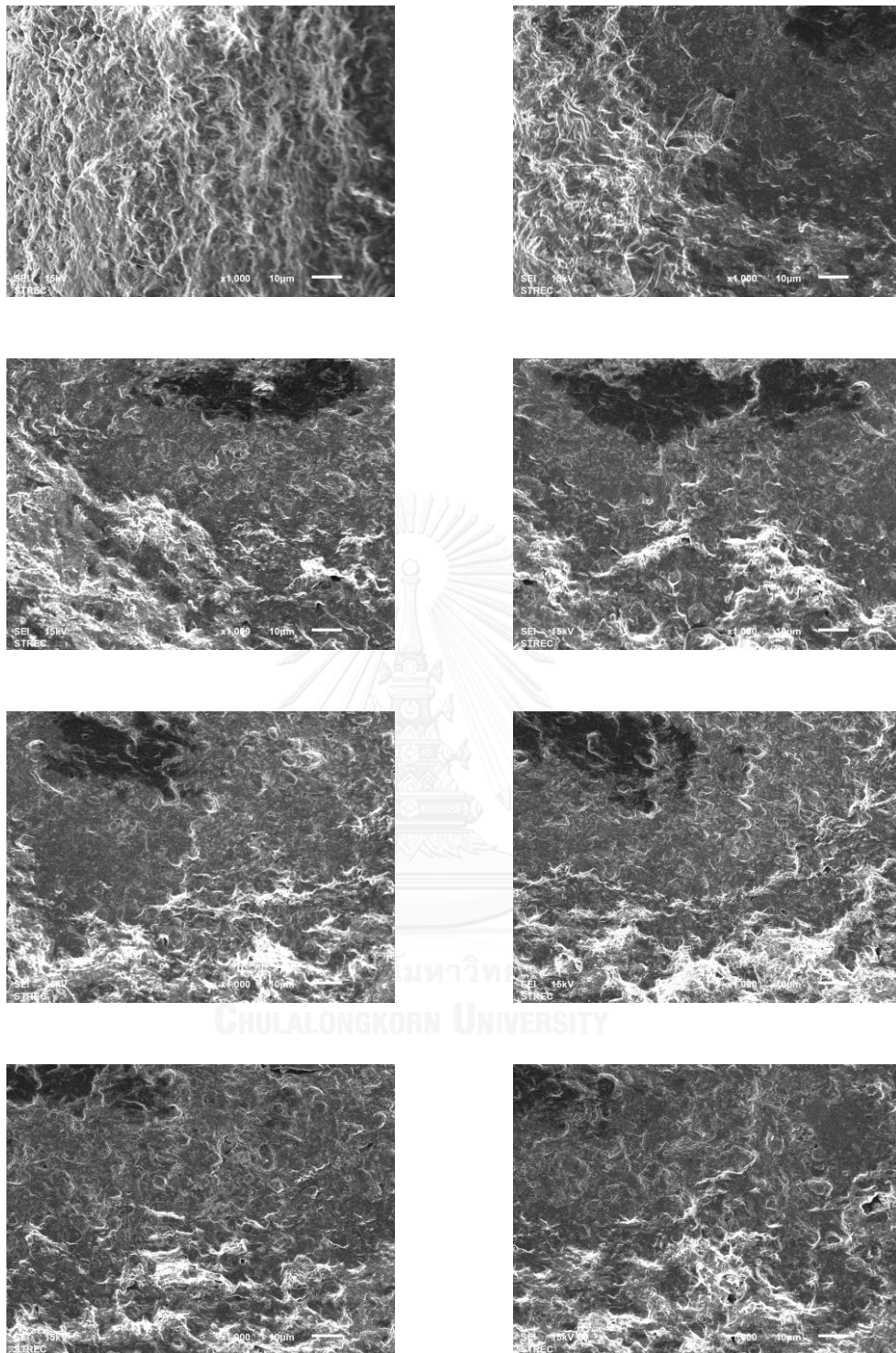
ภาพที่ ก-19 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระโนหลังใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดระโนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)



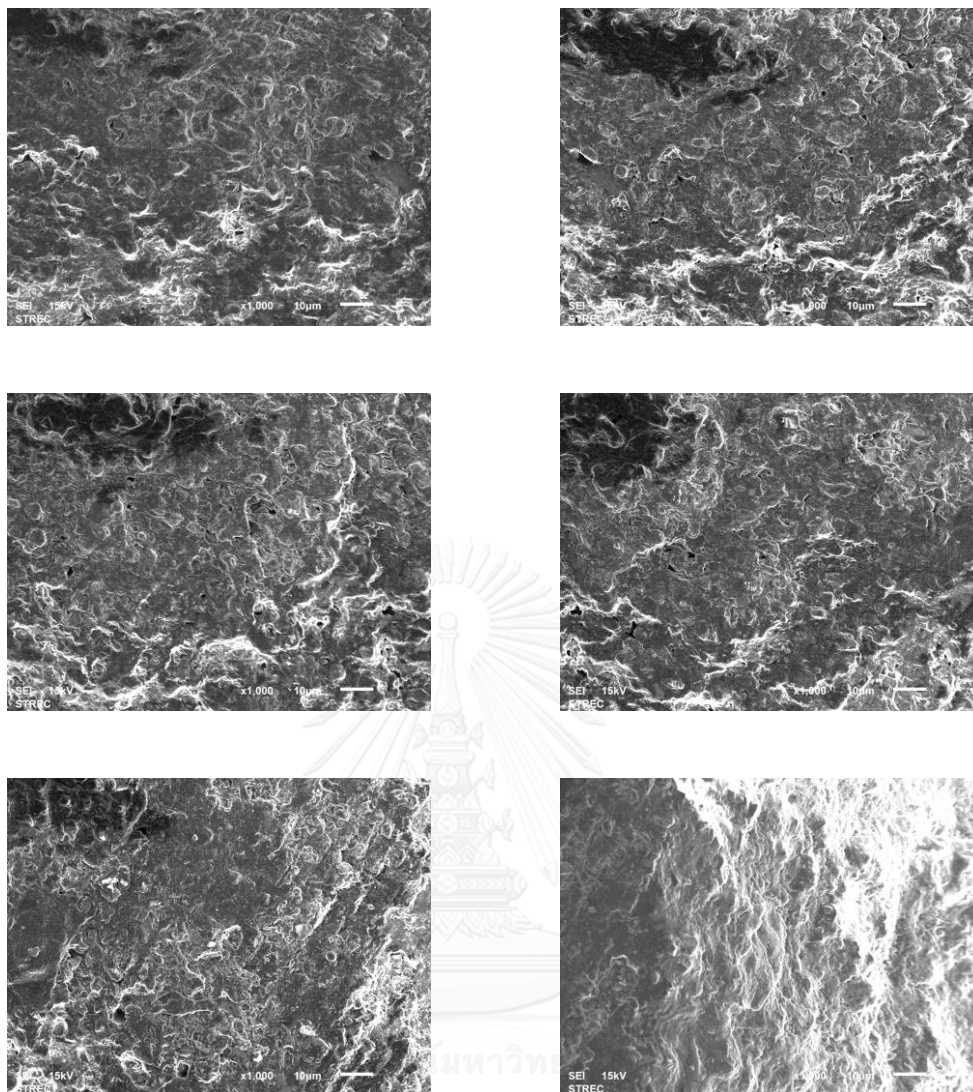
ภาพที่ ก-20 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระโนหลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดระโนที่กำลังขยาย 500 เท่า



ภาพที่ ก-20 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 500 เท่า (ต่อ)

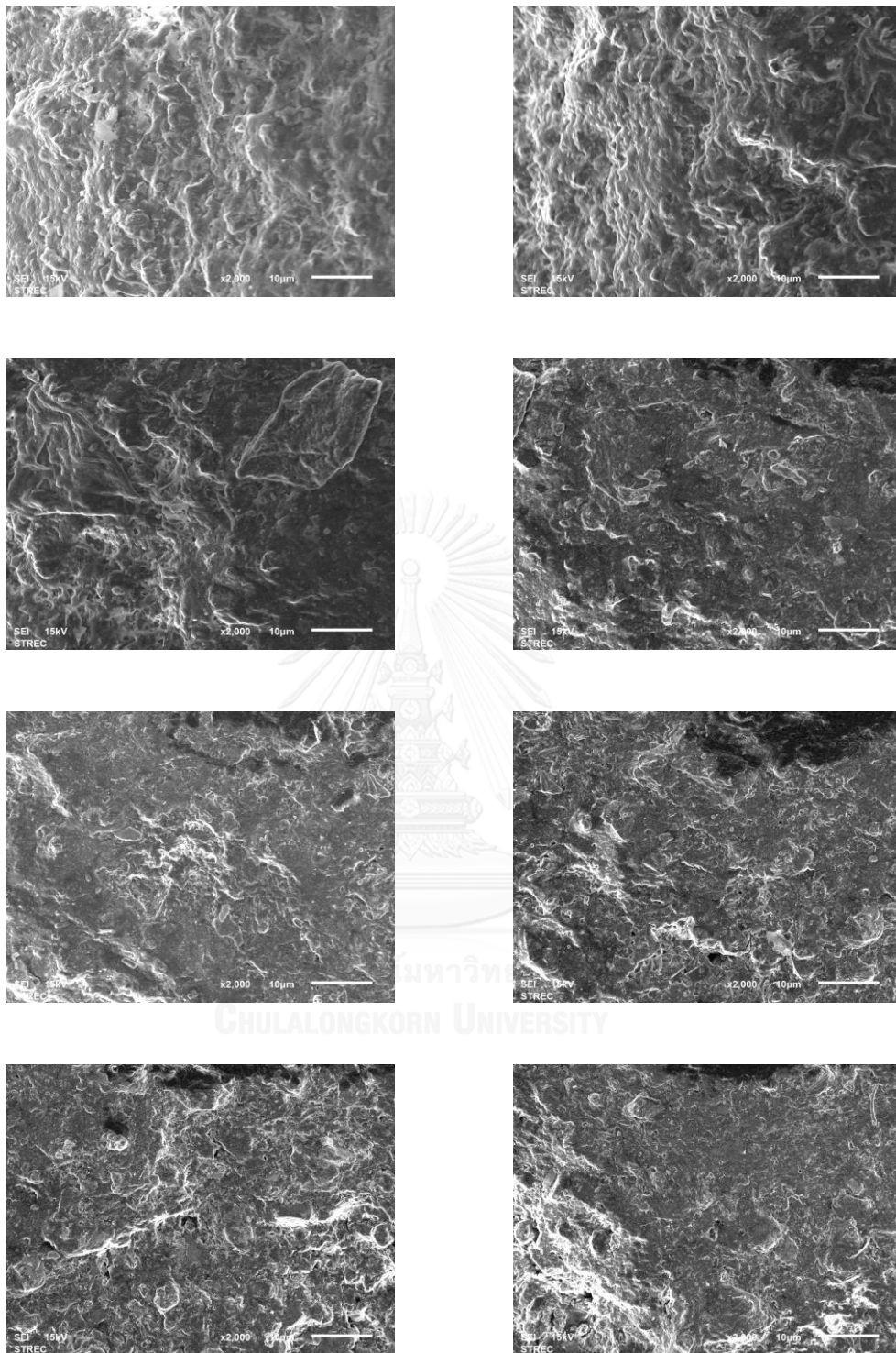


ภาพที่ ก-21 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

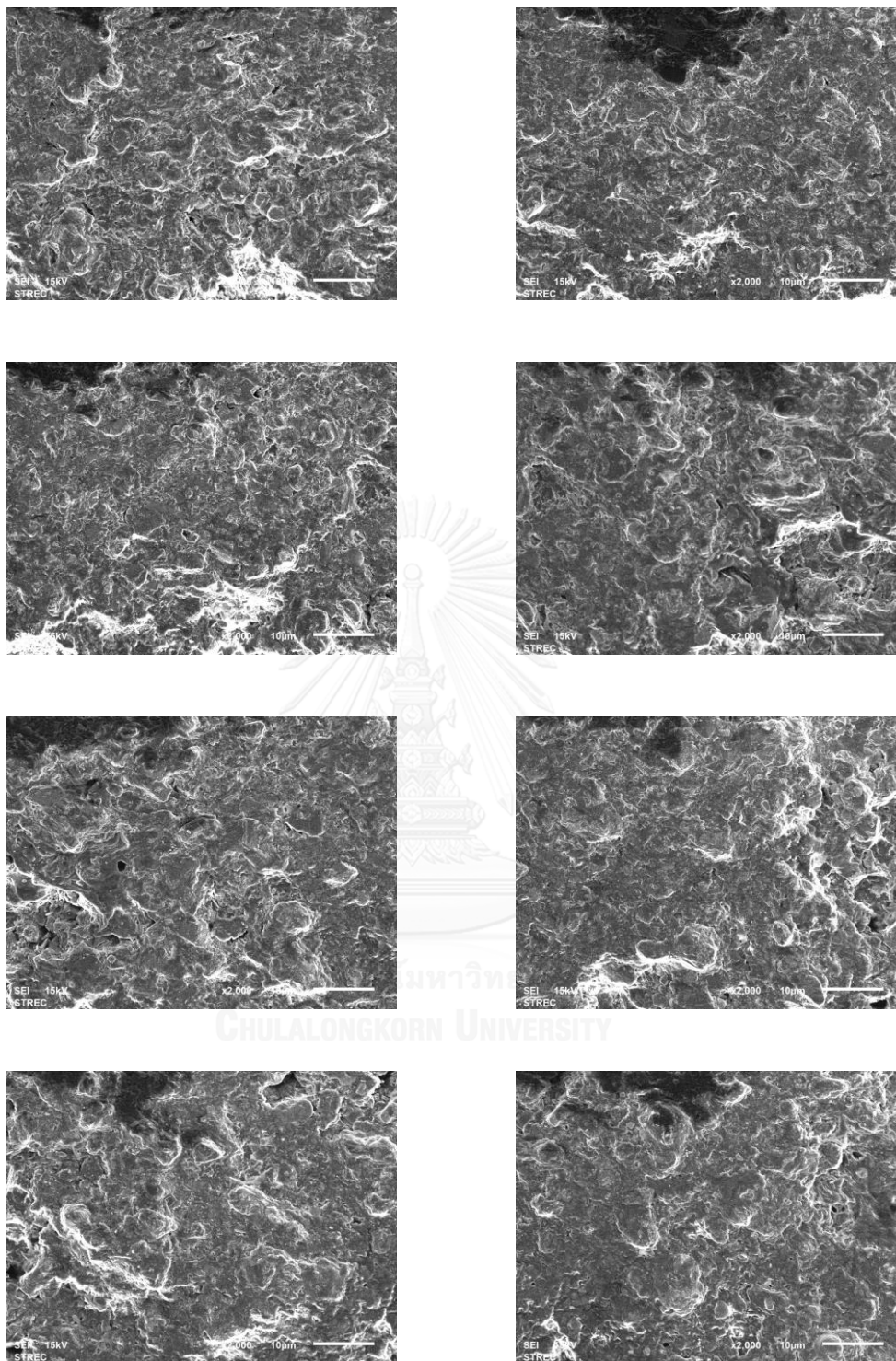


ภาพที่ ก-21 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ซีน ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

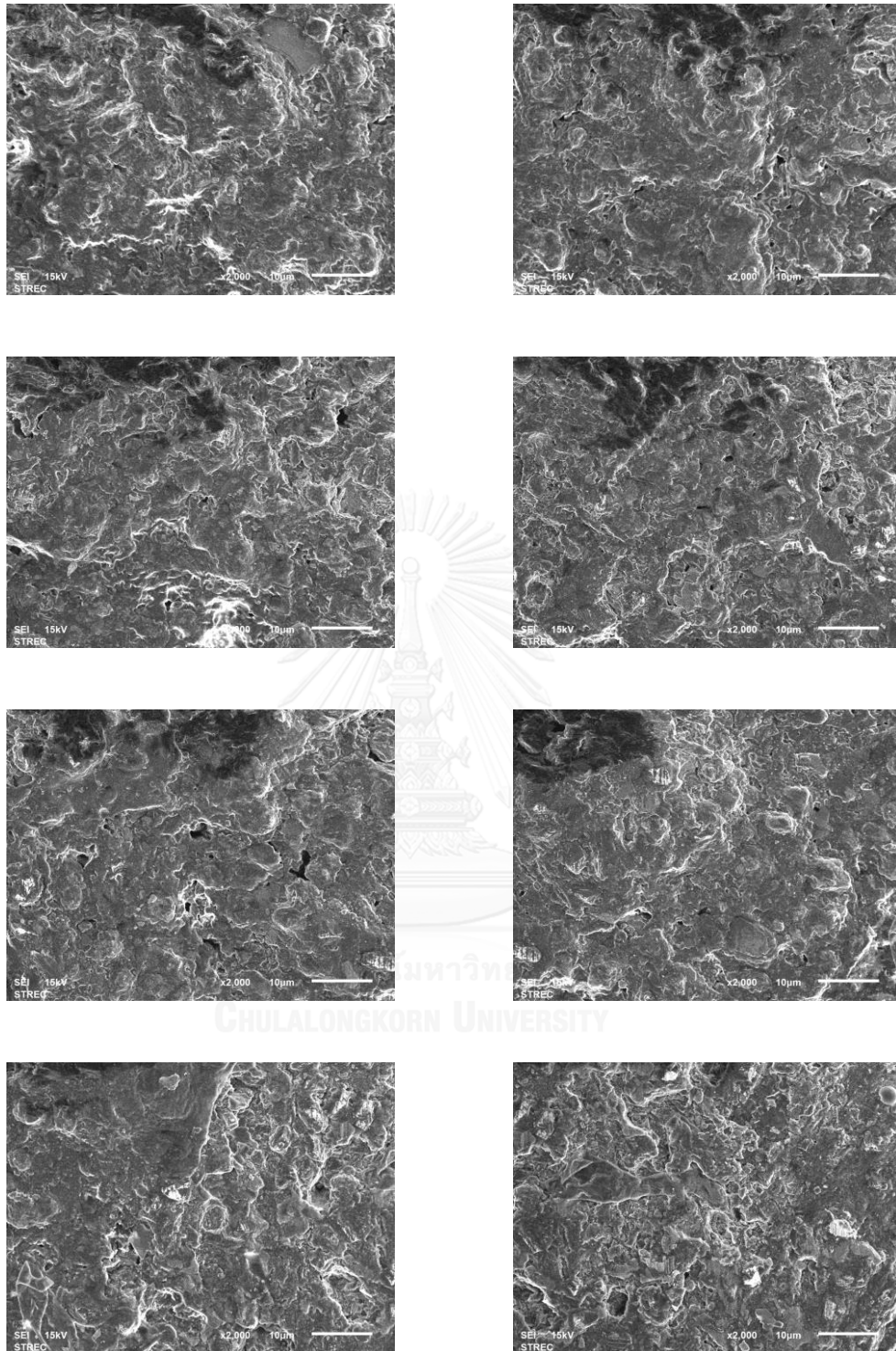
(ต่อ)



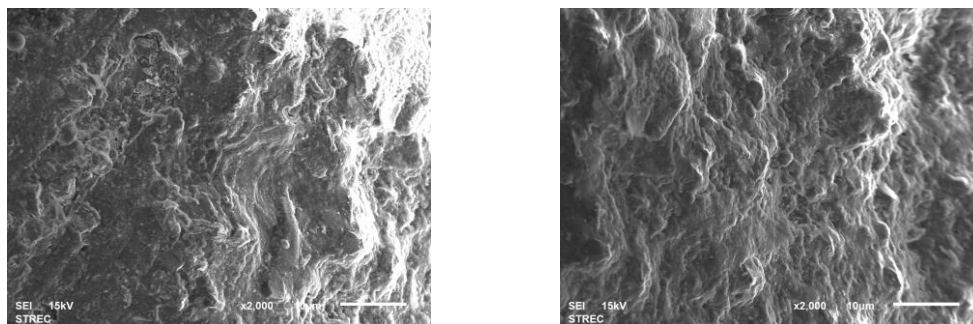
ภาพที่ ก-22 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ซีน ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



ภาพที่ ก-22 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระโนหลังล้มคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ซึ้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดระโนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

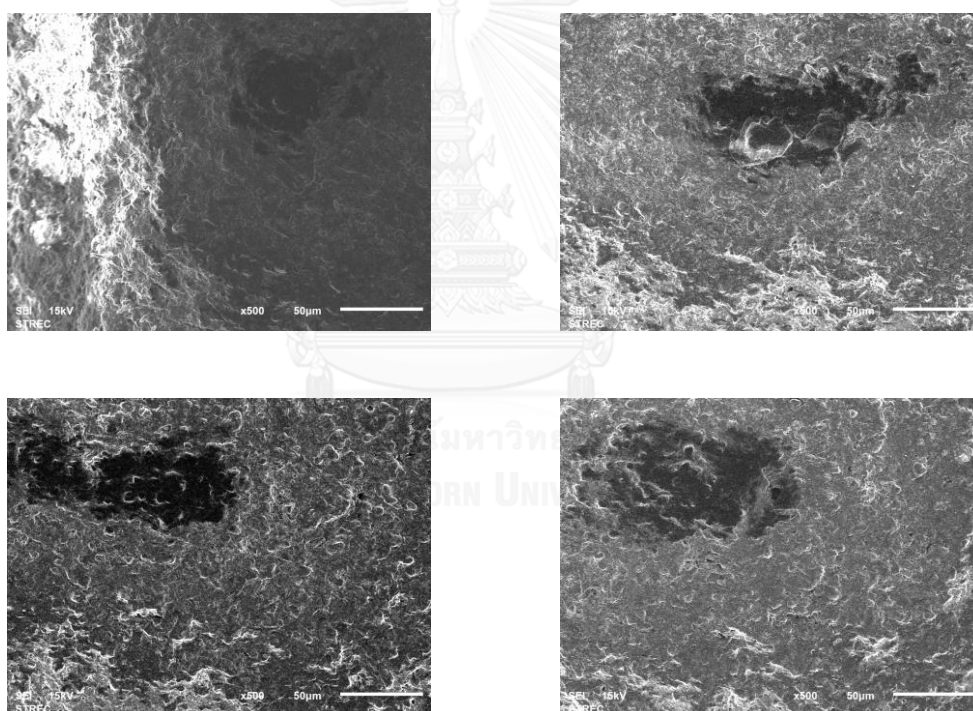


ภาพที่ ก-22 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังล้มคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)



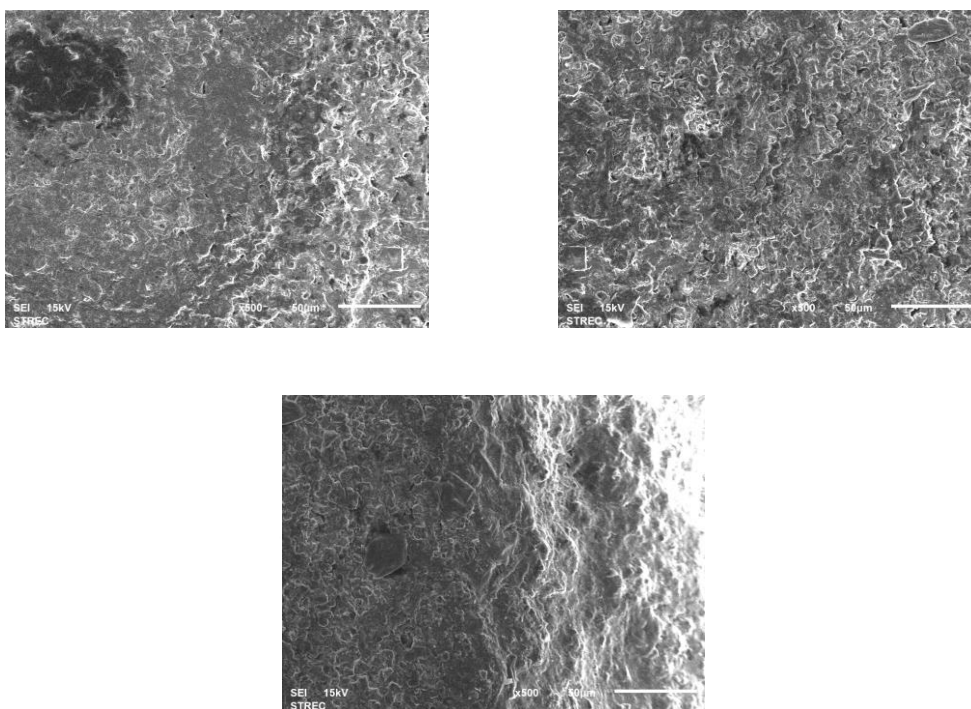
ภาพที่ ก-22 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

(ต่อ)

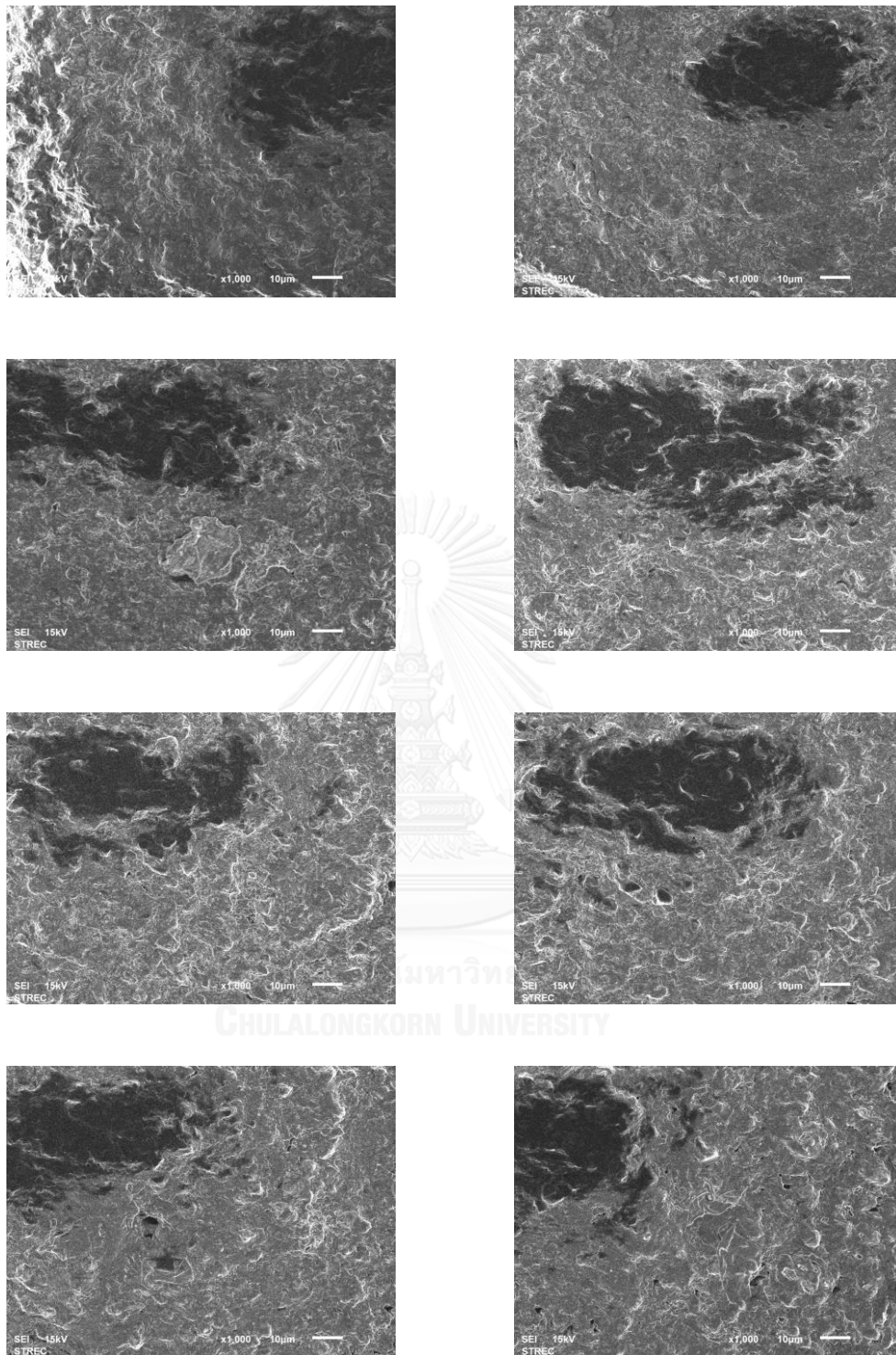


ภาพที่ ก-23 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 500 เท่า

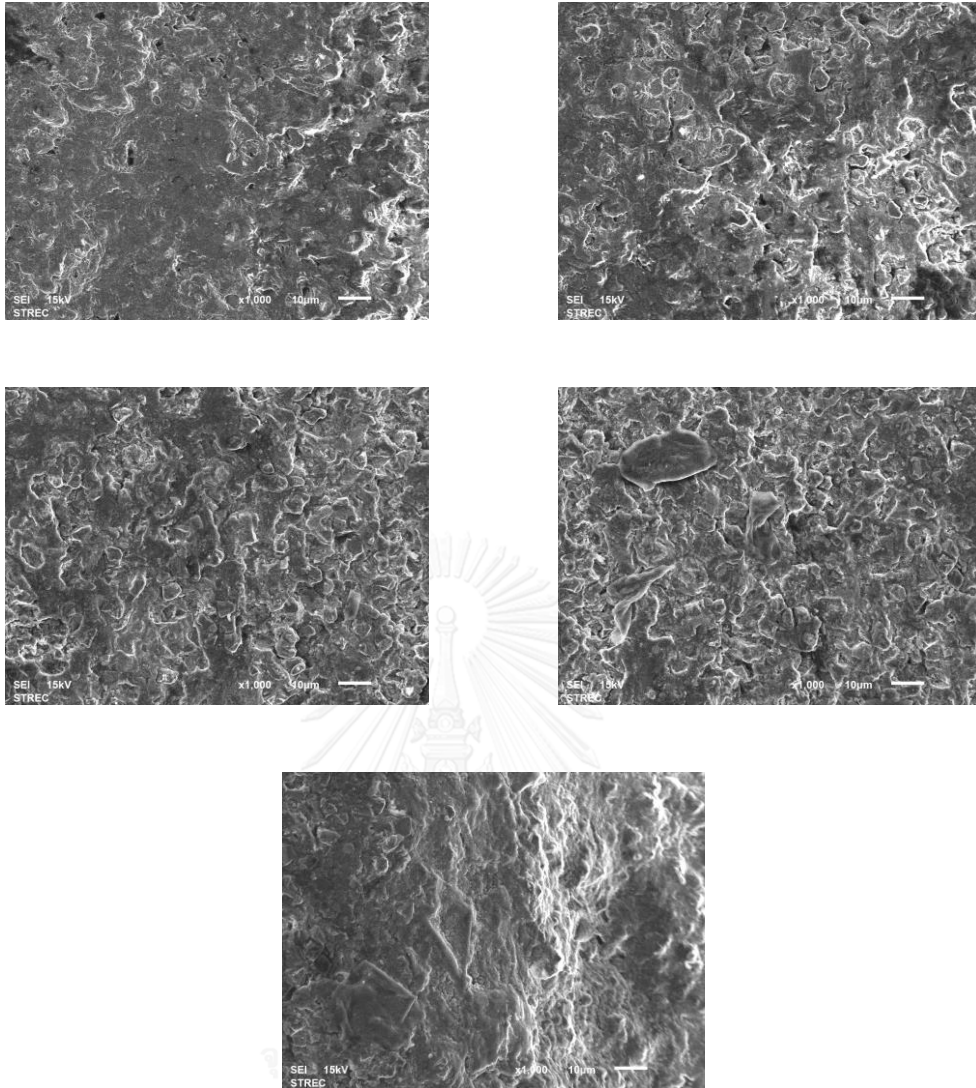




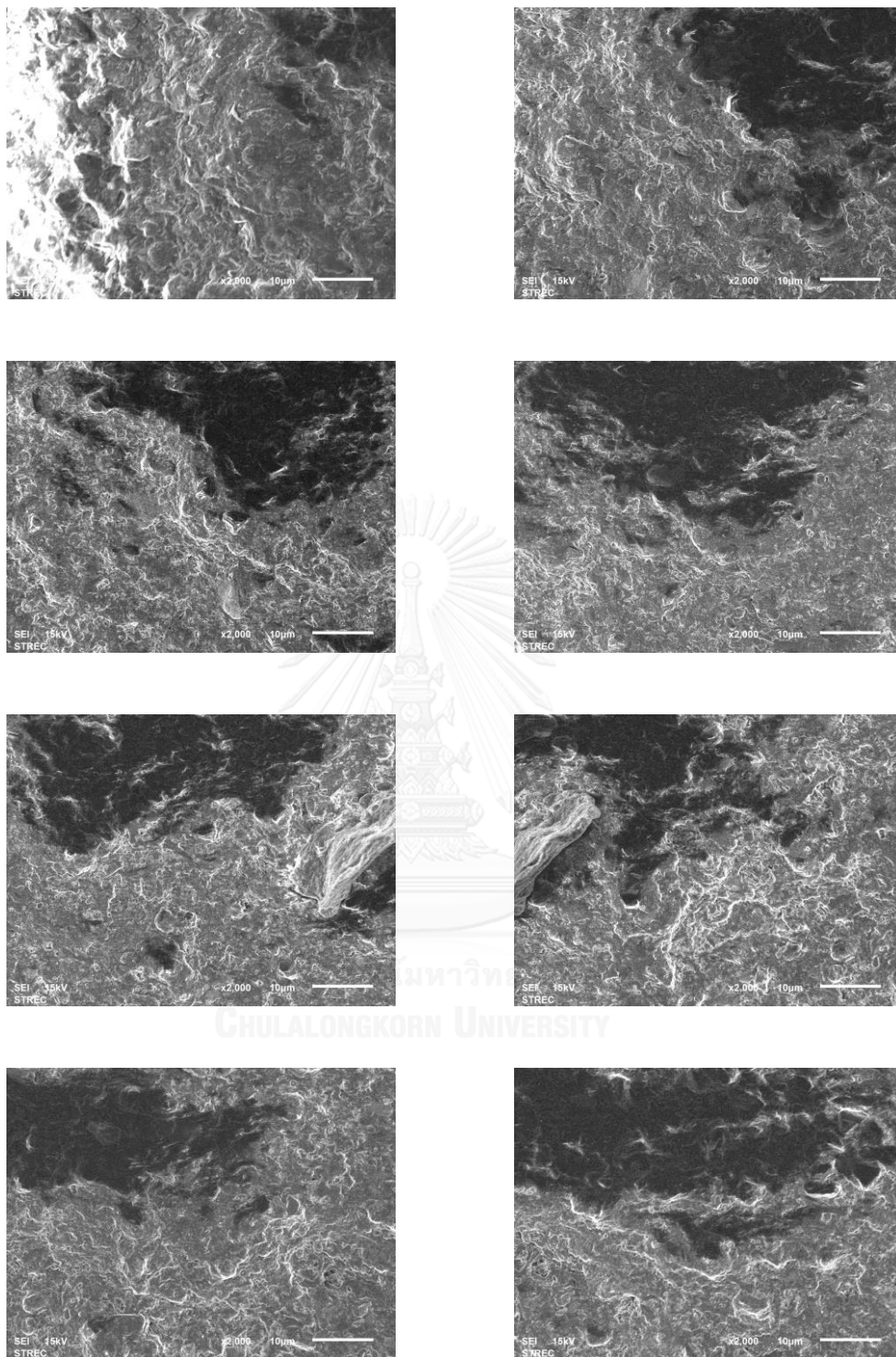
ภาพที่ ก-23 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระไนใช้ใยระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดระไนที่กำลังขยาย 500 เท่า (ต่อ)



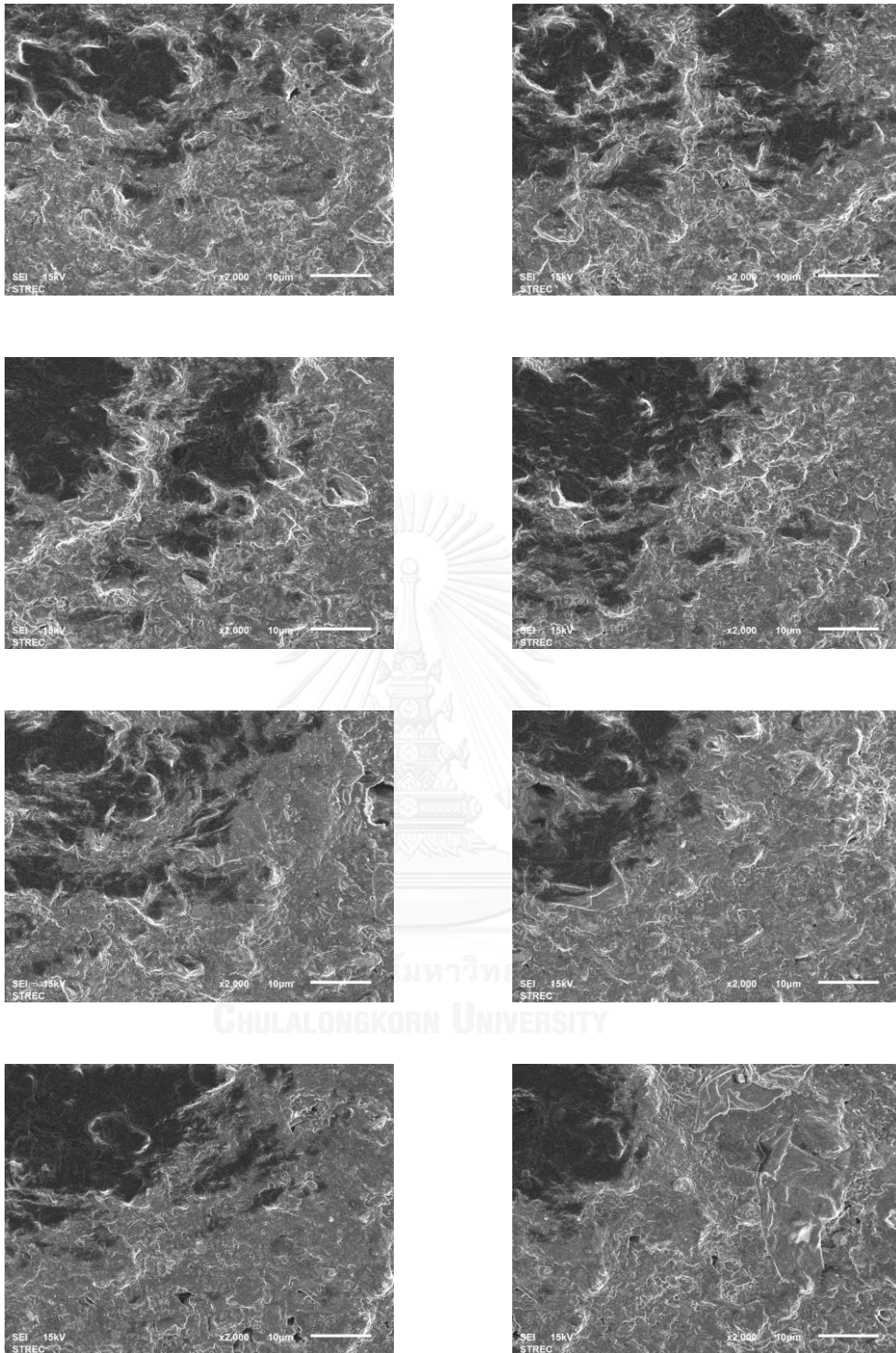
ภาพที่ ก-24 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



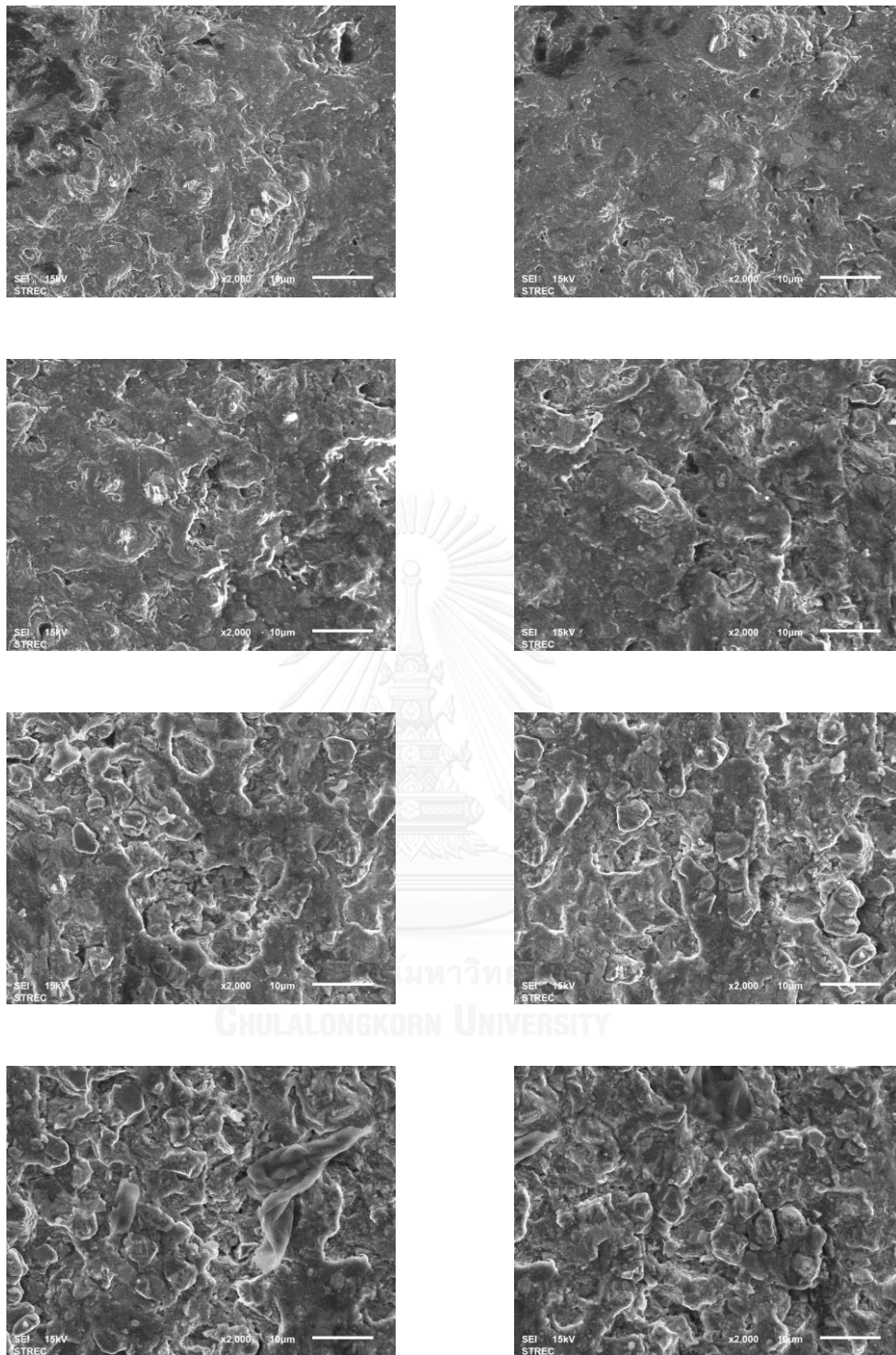
ภาพที่ ก-24 สัณฐานวิทยาของล้อยีระไนใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45°  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยีระไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ต่อ)



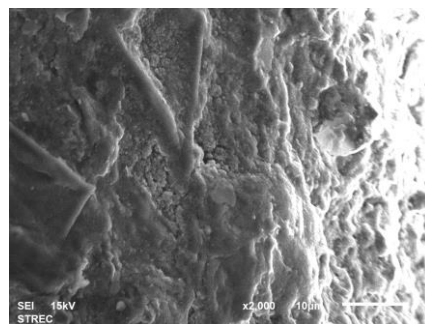
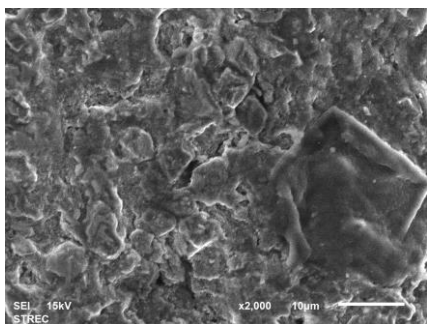
ภาพที่ ก-25 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระไนใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



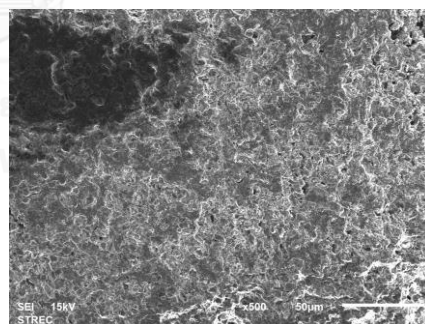
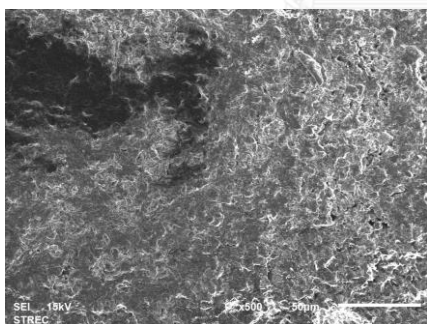
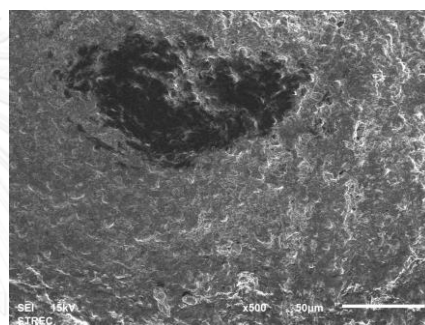
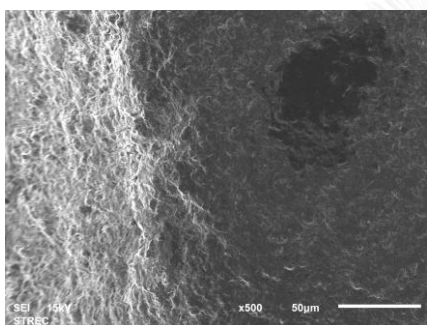
ภาพที่ ก-25 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระไนใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)



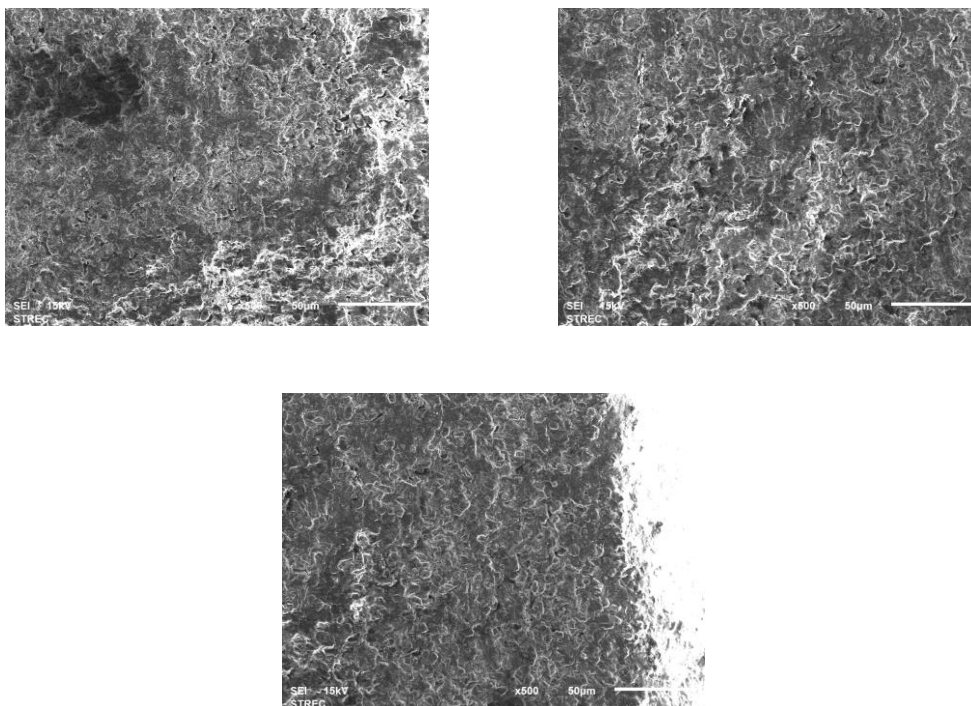
ภาพที่ ก-25 สัณฐานวิทยาของลวดเจียรไนใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45° ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของลวดเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)



ภาพที่ ก-25 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น  
ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

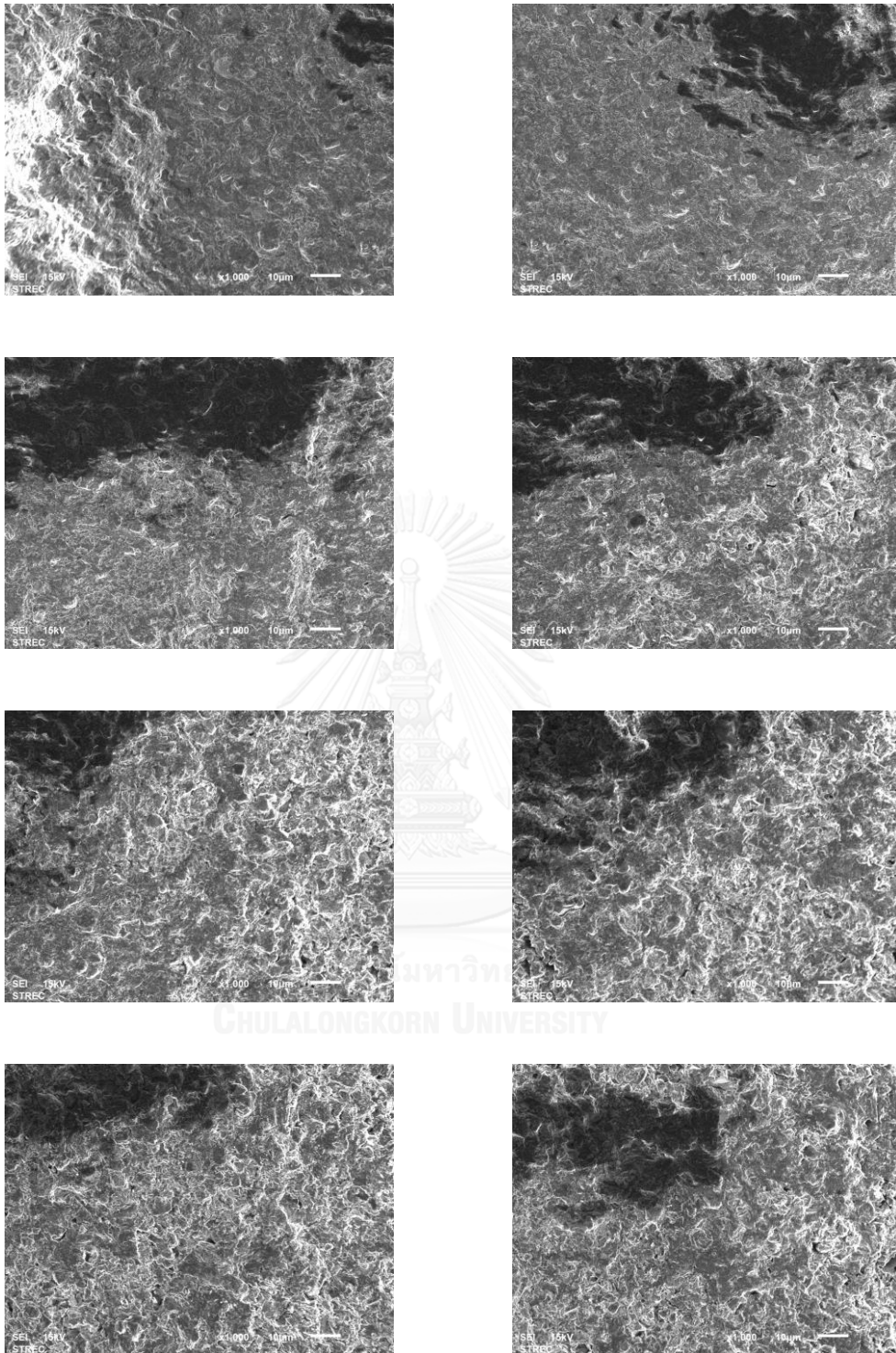


ภาพที่ ก-26 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์  
45 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 500 เท่า

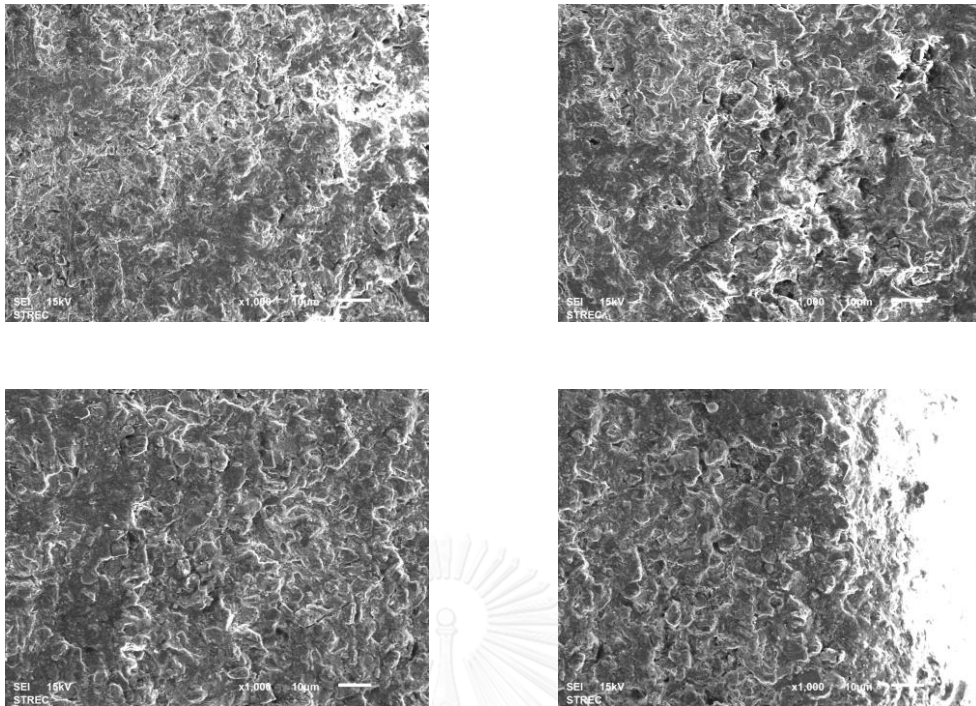


ภาพที่ ก-26 สัณฐานวิทยาของล้อยืดหยุ่นหลังล้มคมแบบปกติต่อจากใช้ยืดหยุ่นอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดหยุ่นที่กำลังขยาย 500 เท่า (ต่อ)

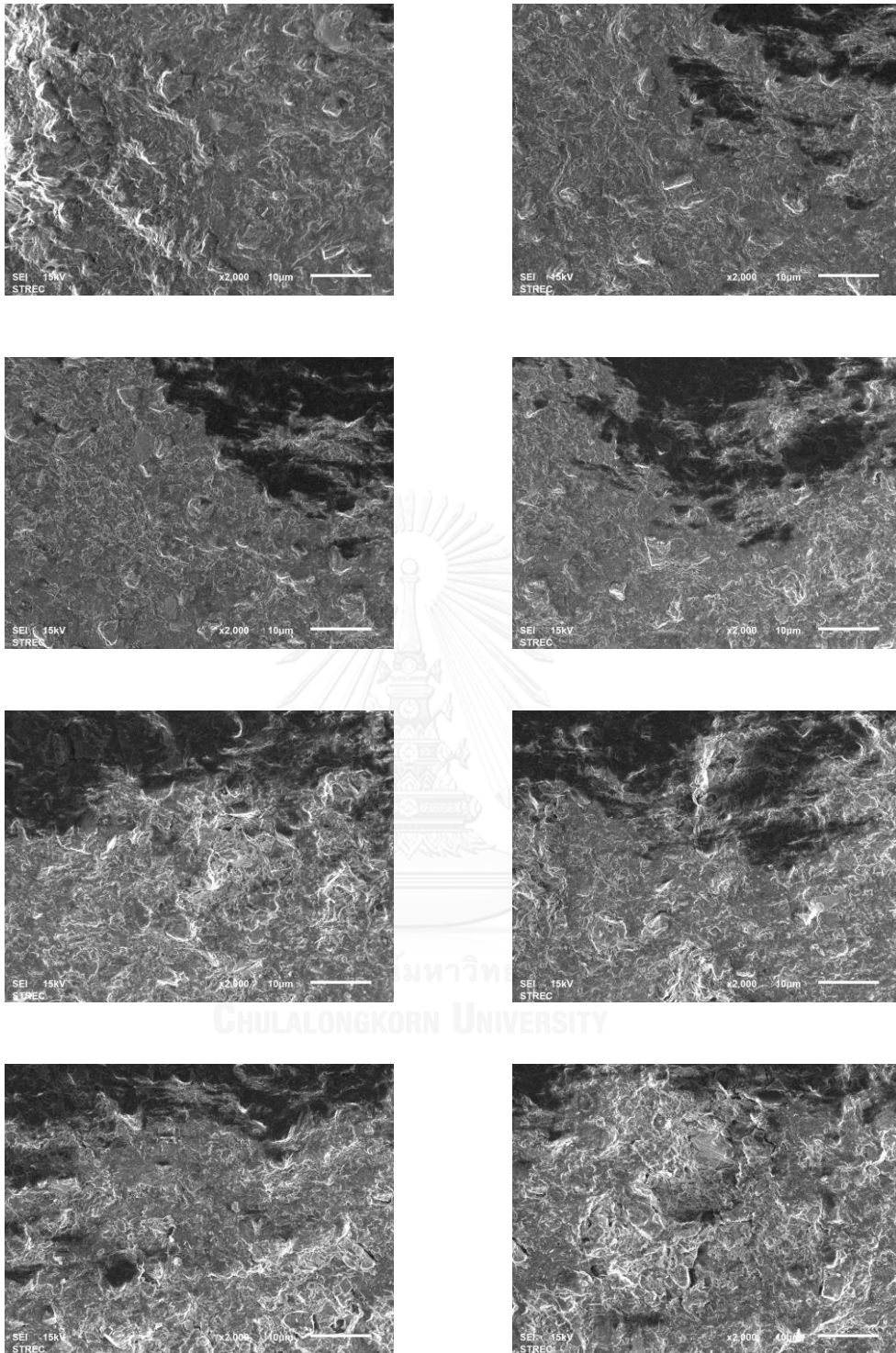




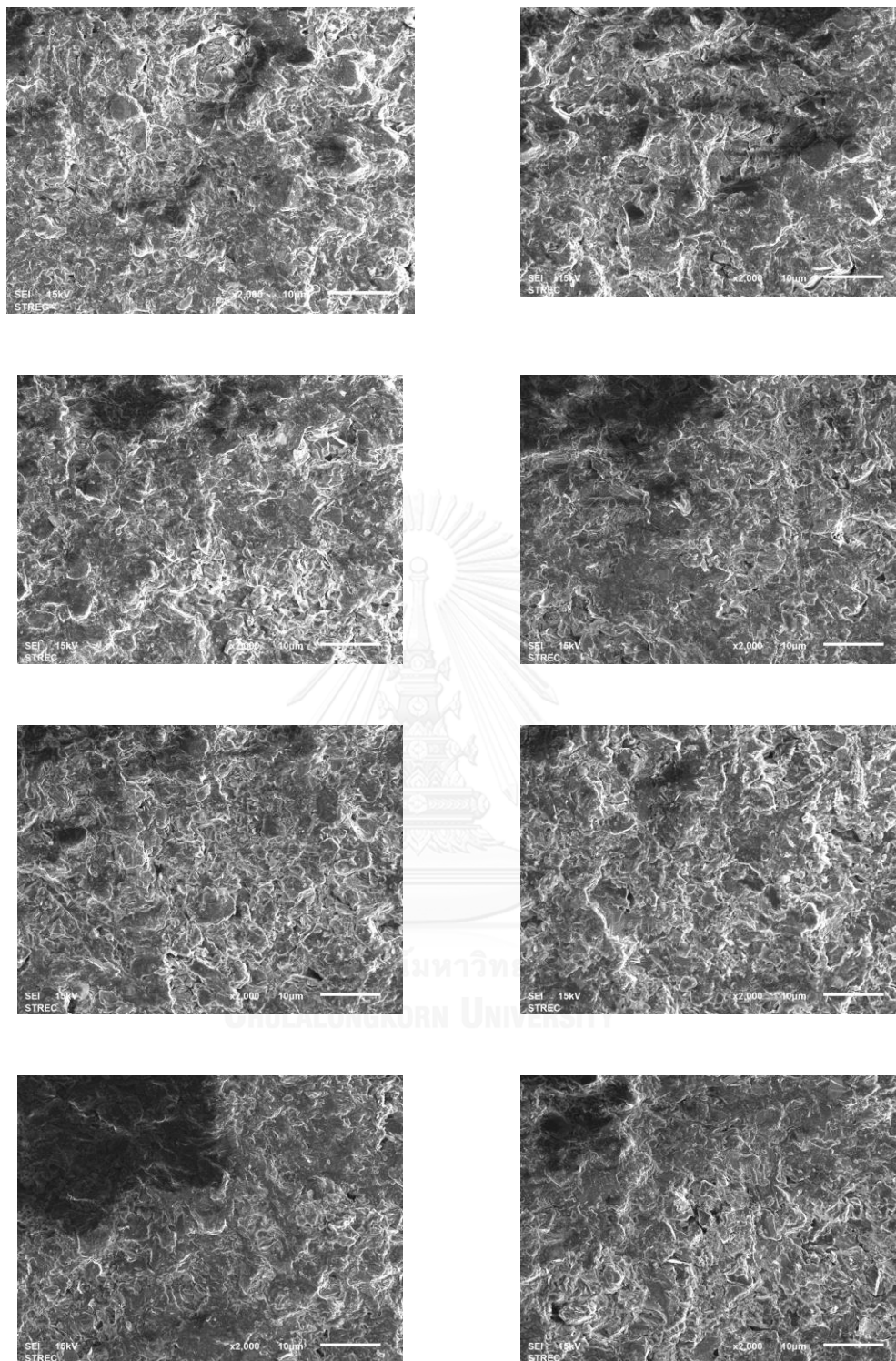
ภาพที่ ก-27 สัณฐานวิทยาของล้อยืดระไนหลังสับคมแบบปกติต่อจากใช้เยื่อระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยืดระไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า



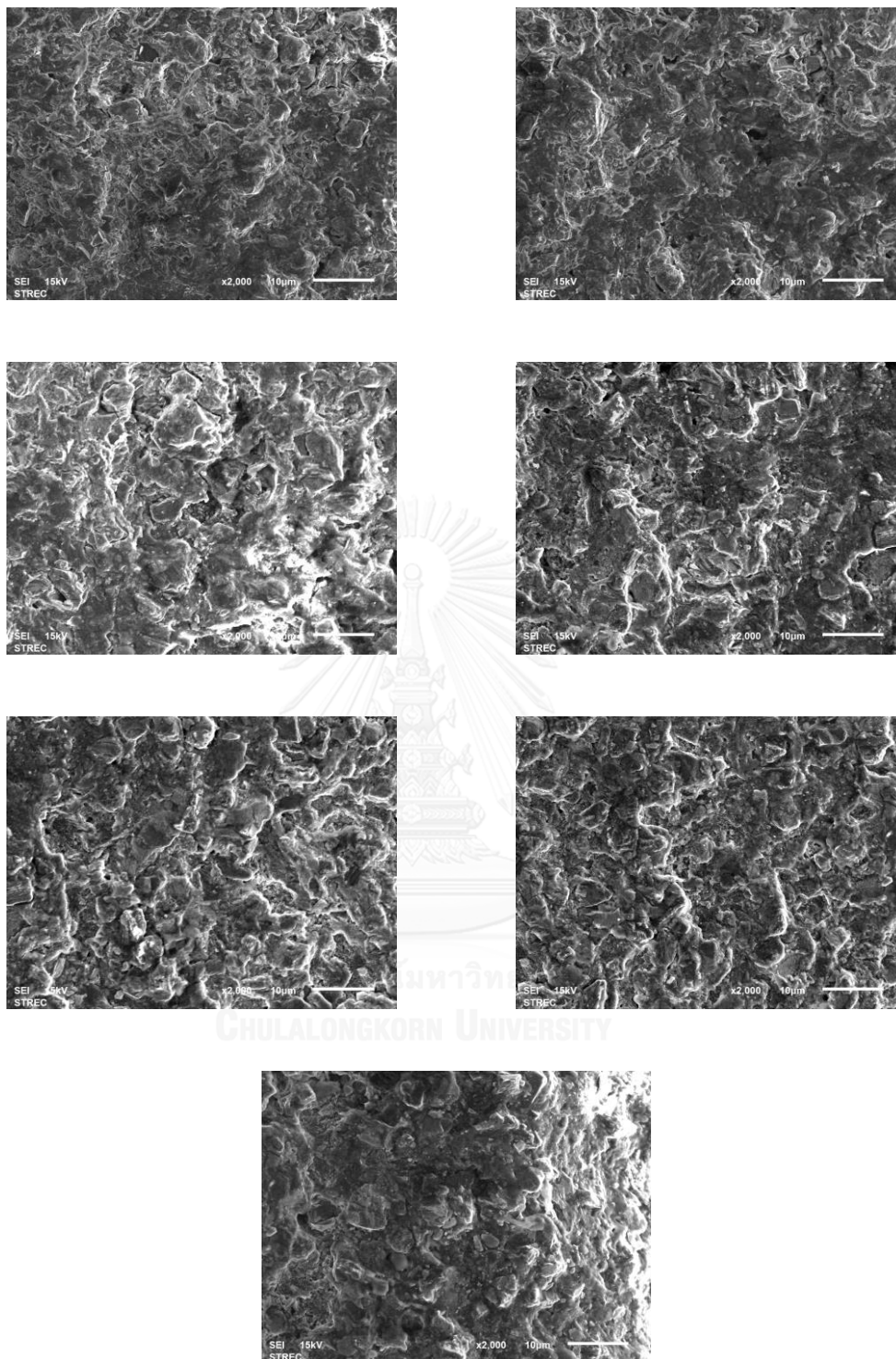
ภาพที่ ก-27 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ซีน ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ต่อ)



ภาพที่ ก-28 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ซีน ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



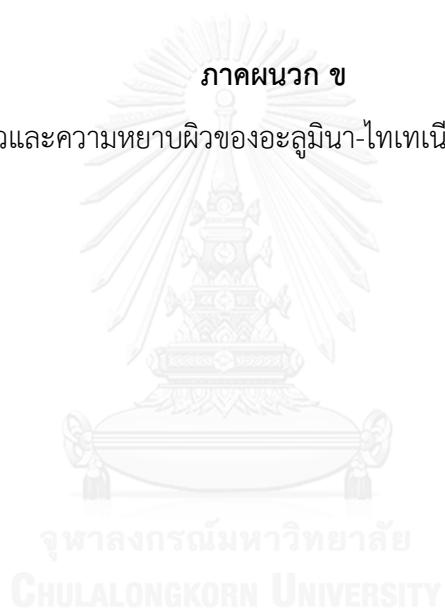
ภาพที่ ก-28 สัณฐานวิทยาของล้อยีระไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้่น ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยีระไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

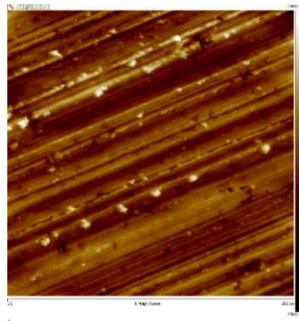


ภาพที่ ก-28 สัณฐานวิทยาของล้อยเจียรไนหลังลับคมแบบปกติต่อจากใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ซีน ตำแหน่งที่หนึ่งตลอดความกว้างของล้อยเจียรไนที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

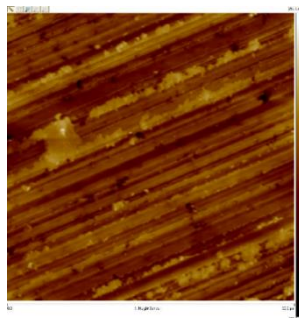
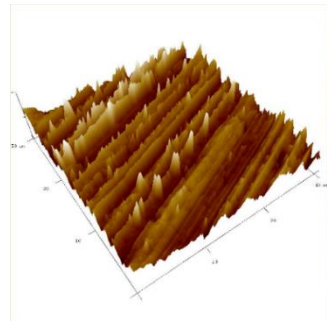
**ภาคผนวก ข**

ผิวและความหยาบผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

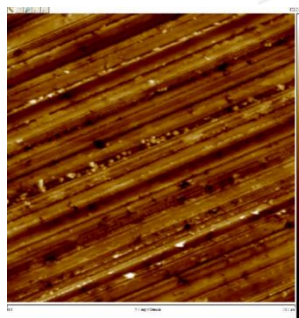
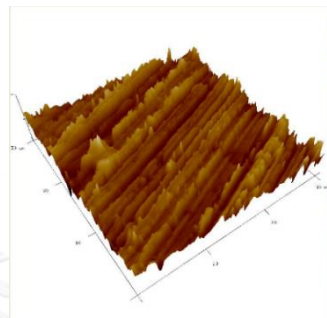




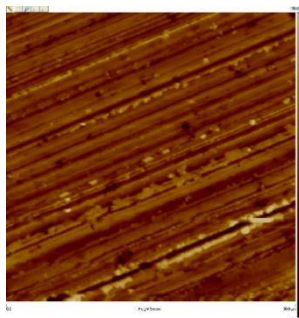
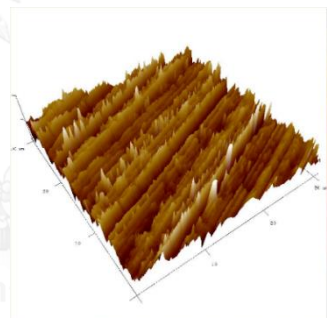
ชั้นที่ 1



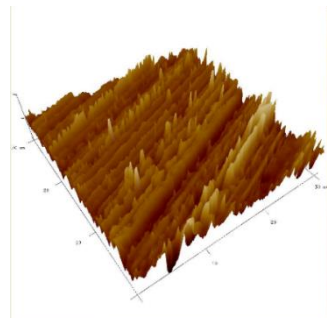
ชั้นที่ 2



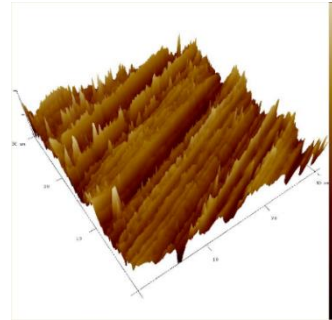
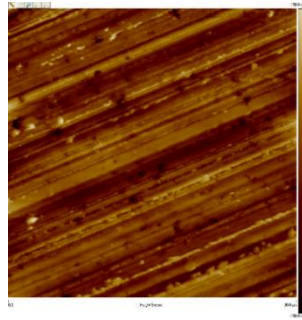
ชั้นที่ 3



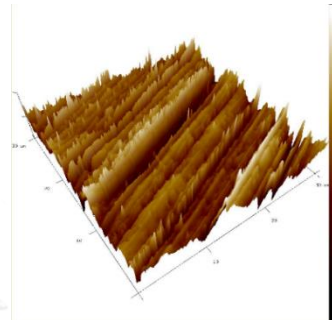
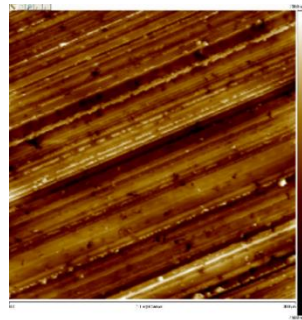
ชั้นที่ 4



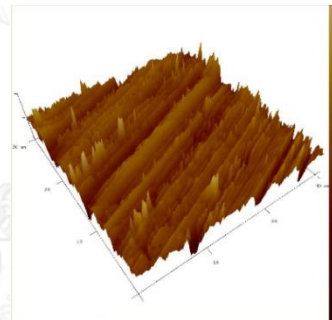
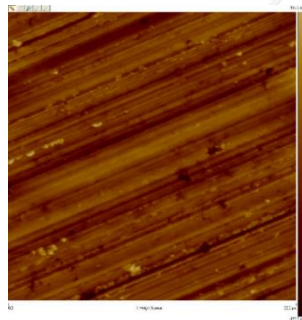
ภาพที่ ข-1 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน  
หลังลับคมครั้งแรก



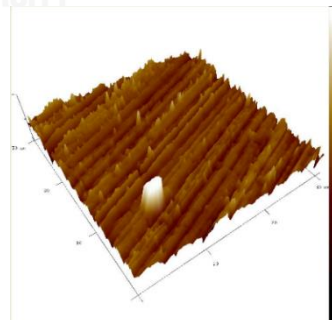
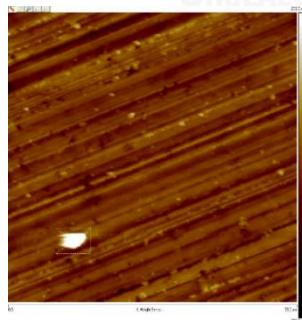
ชั้นที่ 5



ชั้นที่ 6



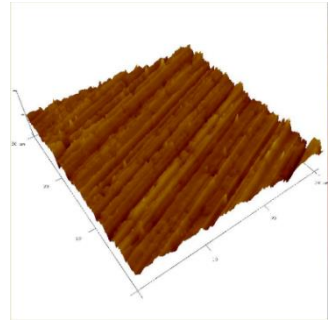
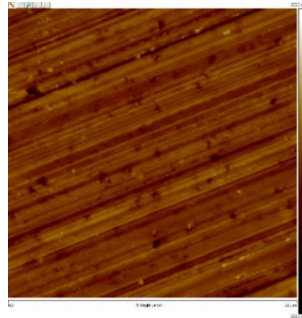
ชั้นที่ 7



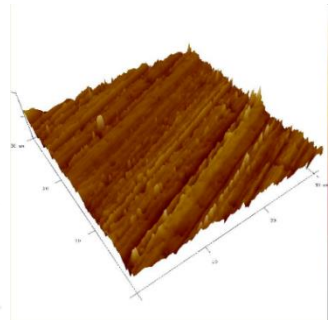
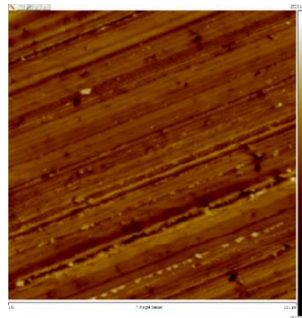
ชั้นที่ 8

ภาพที่ ข-1 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมครั้งแรก (ต่อ)

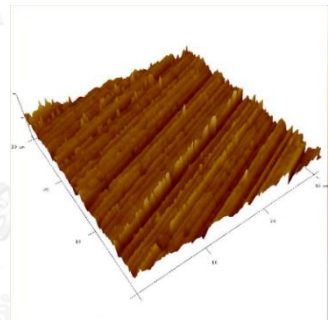
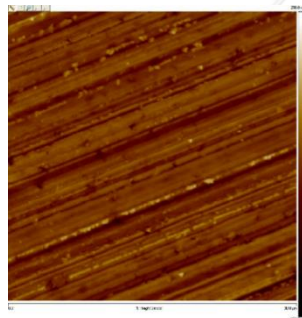




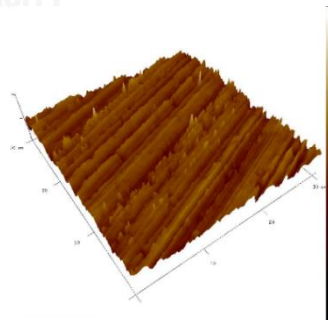
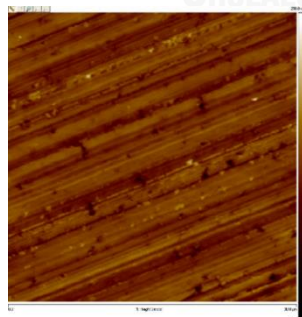
ชั้นที่ 9



ชั้นที่ 10

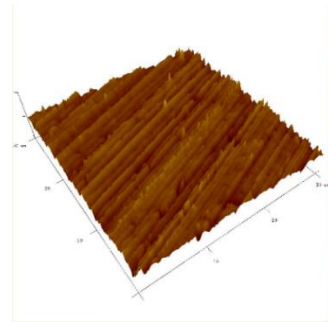
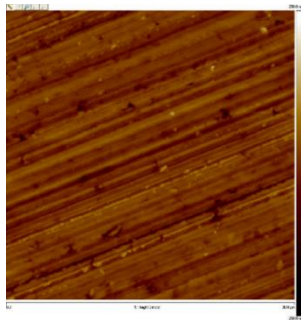


ชั้นที่ 11

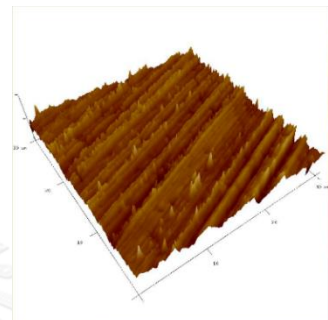
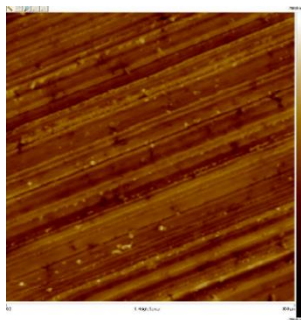


ชั้นที่ 12

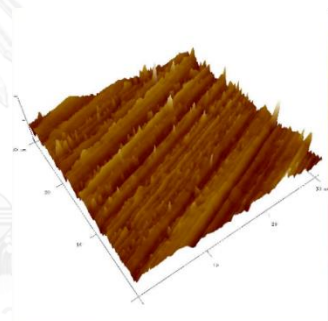
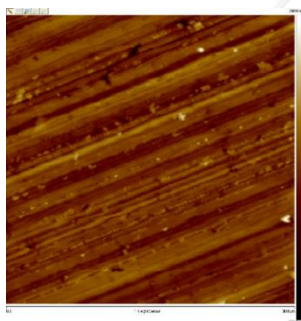
ภาพที่ ข-1 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมครั้งแรก (ต่อ)



ชั้นที่ 13

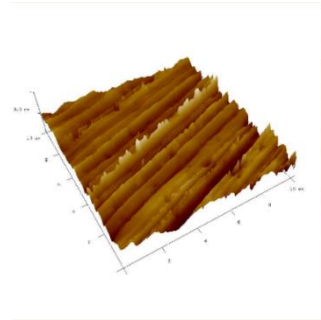
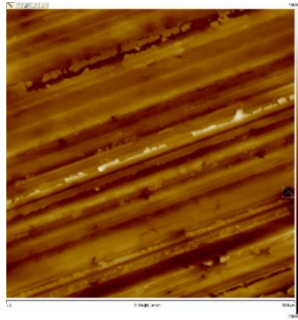


ชั้นที่ 14

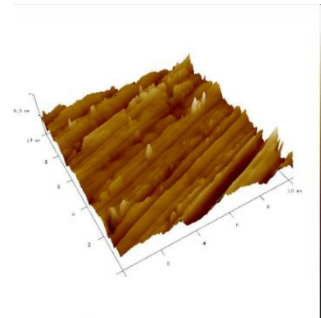
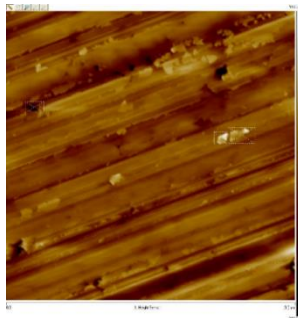


ชั้นที่ 15

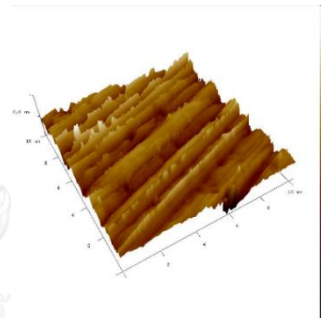
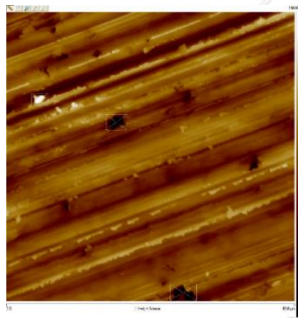
ภาพที่ ข-1 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อ  
เจียรไนหลังลับคมครั้งแรก (ต่อ)



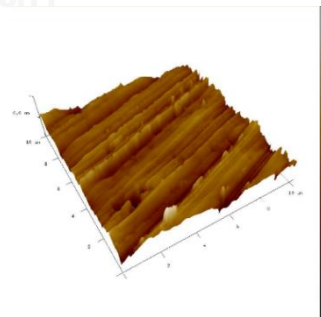
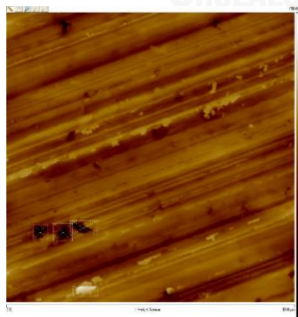
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

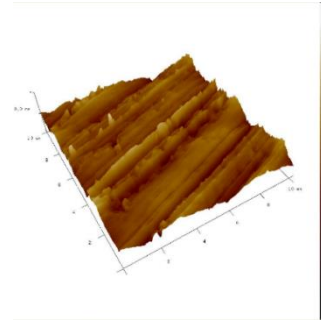
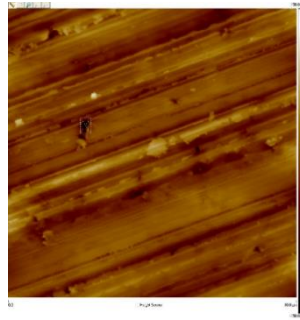


ชั้นที่ 3

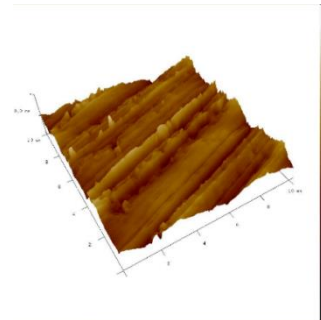
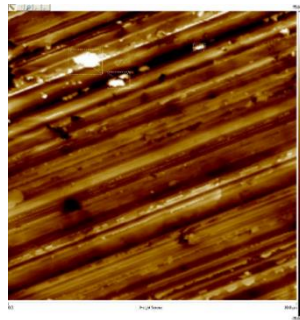


ชั้นที่ 4

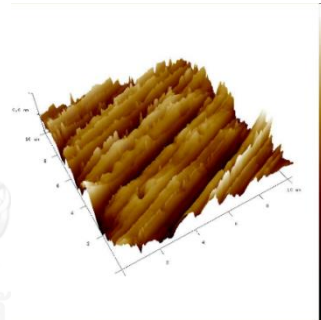
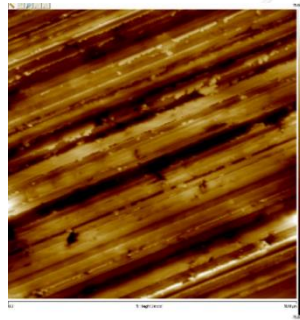
ภาพที่ ข-2 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น



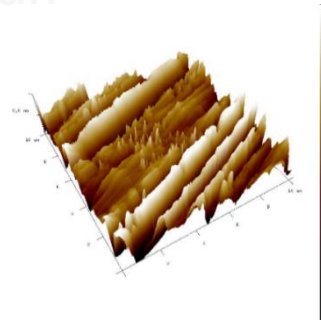
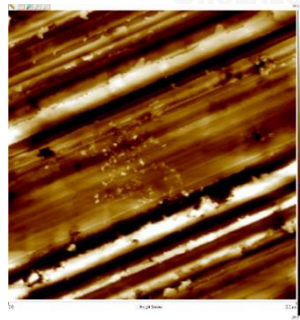
ชั้นที่ 5



ชั้นที่ 6

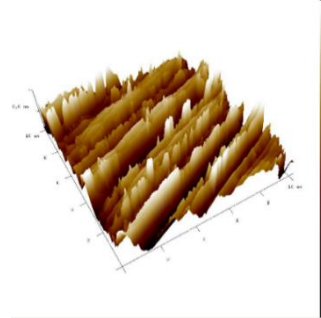
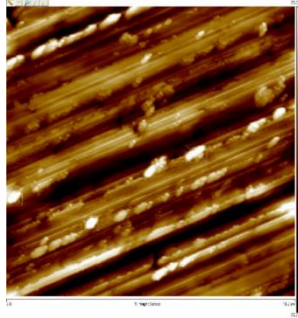


ชั้นที่ 7

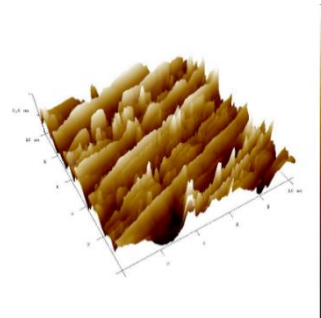
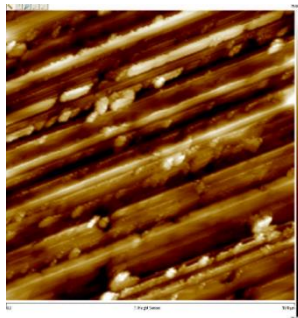


ชั้นที่ 8

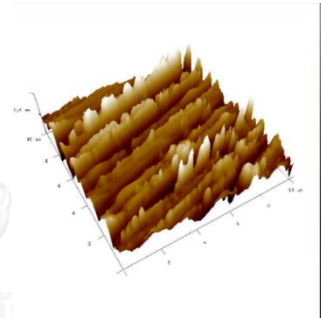
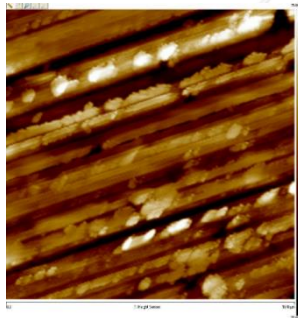
ภาพที่ ข-2 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (ต่อ)



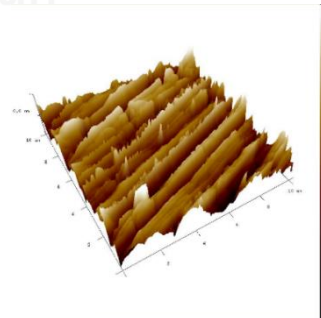
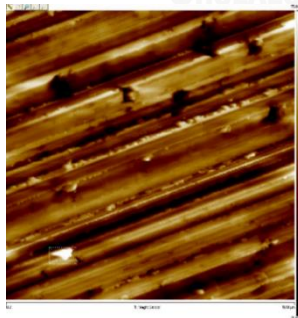
ชั้นที่ 9



ชั้นที่ 10

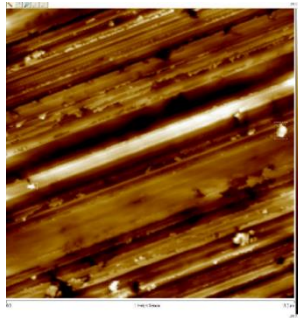


ชั้นที่ 11

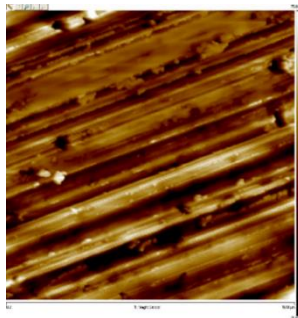
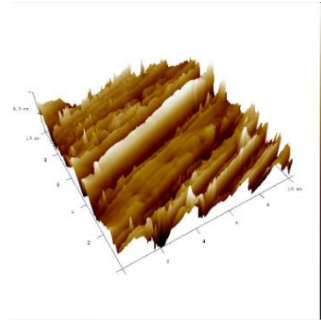


ชั้นที่ 12

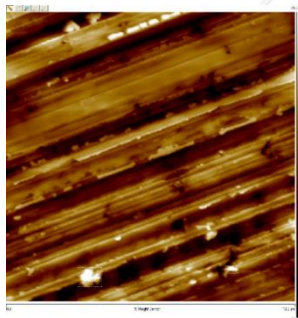
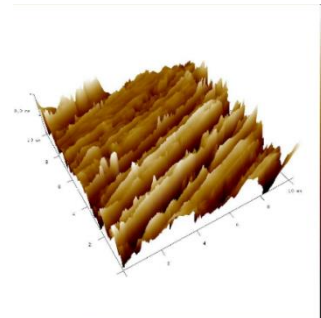
ภาพที่ ข-2 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (ต่อ)



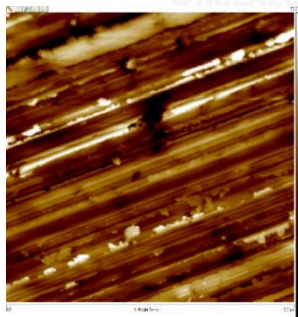
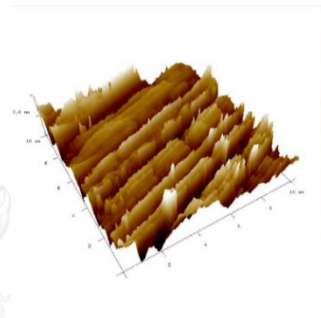
ชั้นที่ 13



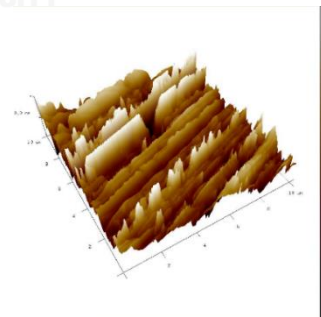
ชั้นที่ 14



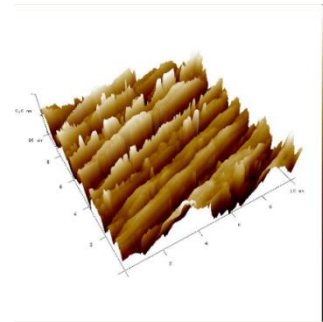
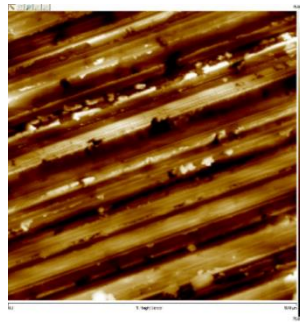
ชั้นที่ 15



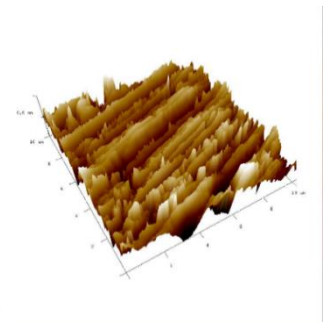
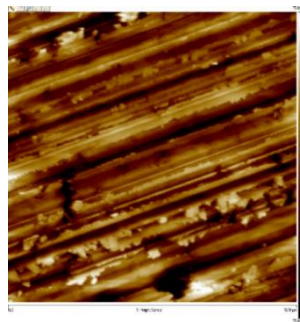
ชั้นที่ 16



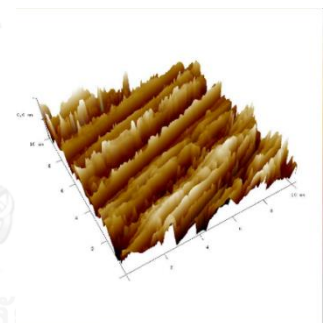
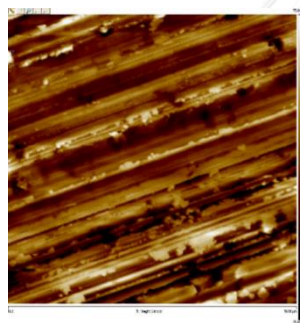
ภาพที่ ข-2 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (ต่อ)



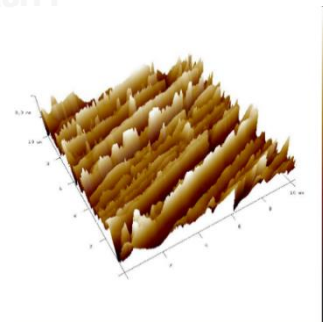
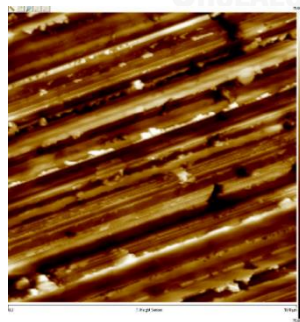
ชั้นที่ 17



ชั้นที่ 18

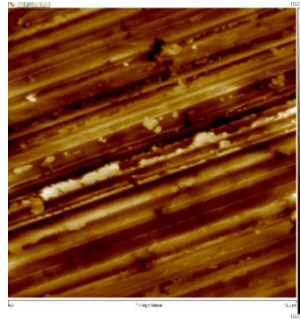


ชั้นที่ 19

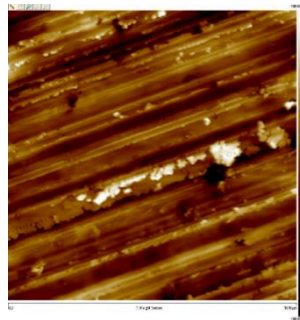
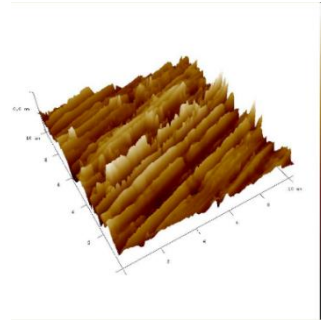


ชั้นที่ 20

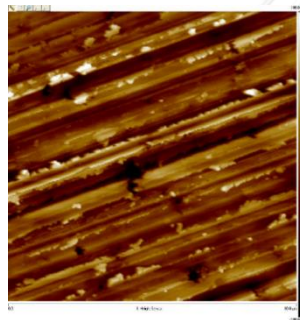
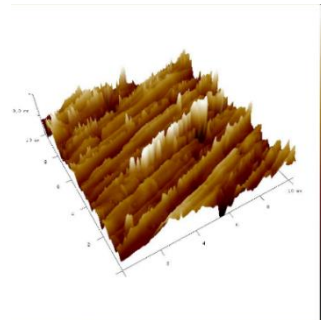
ภาพที่ ข-2 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (ต่อ)



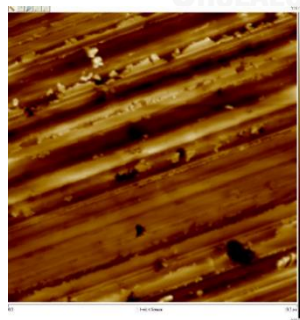
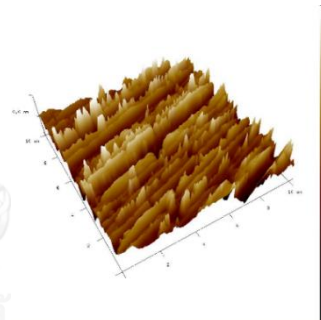
ชั้นที่ 21



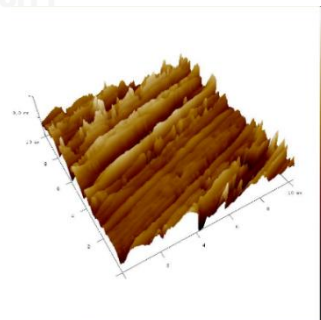
ชั้นที่ 22



ชั้นที่ 23

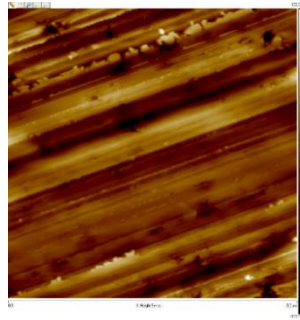


ชั้นที่ 24

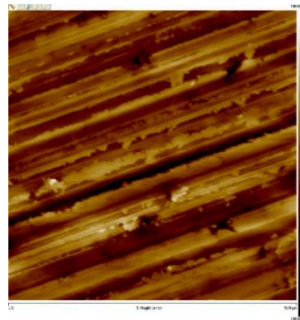
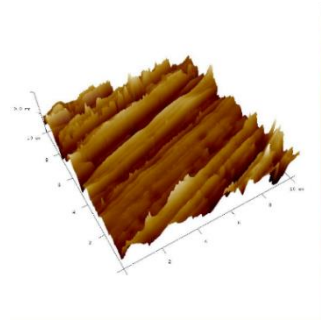


ภาพที่ ข-2 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (ต่อ)

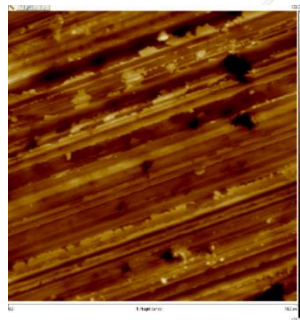
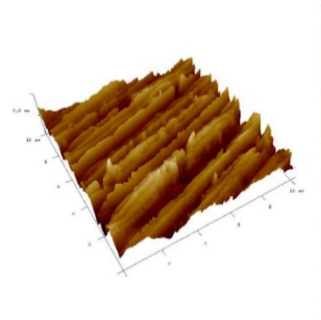




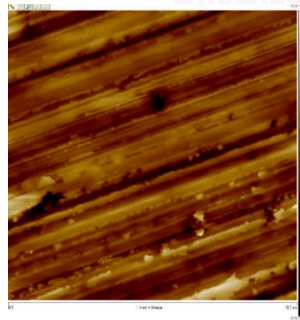
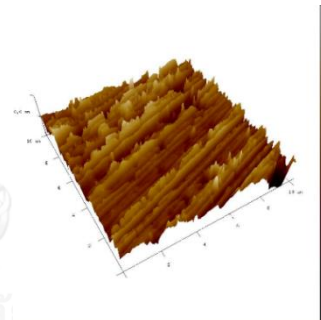
ชั้นที่ 25



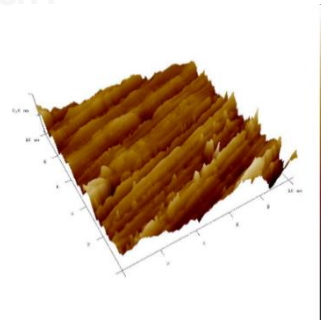
ชั้นที่ 26



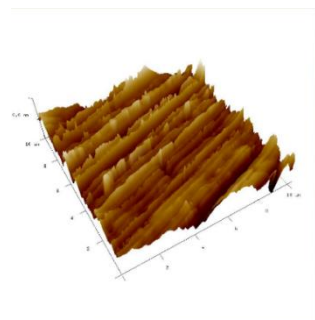
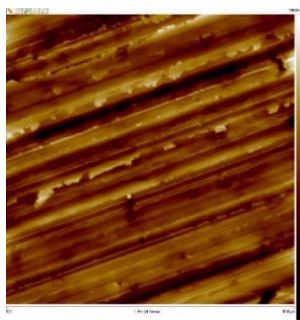
ชั้นที่ 27



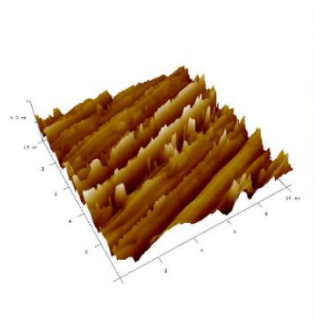
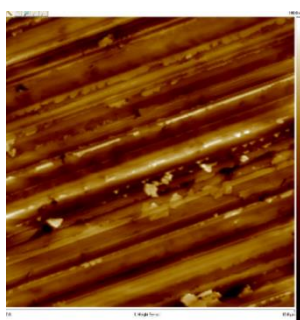
ชั้นที่ 28



ภาพที่ ข-2 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (ต่อ)

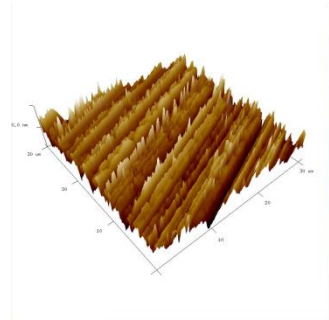
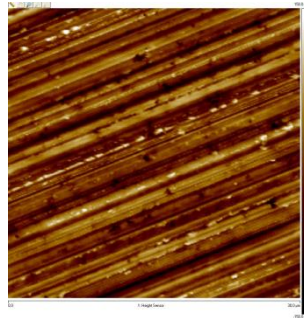


ชั้นที่ 29

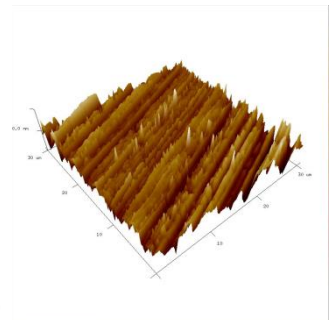
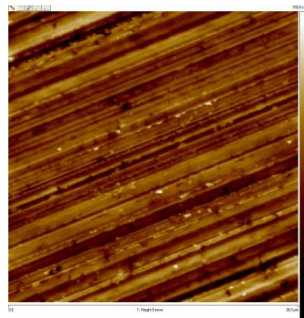


ชั้นที่ 30

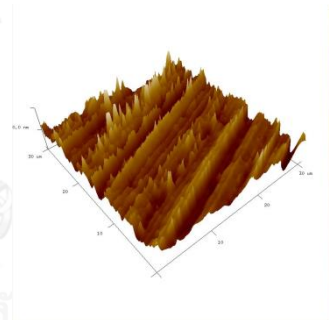
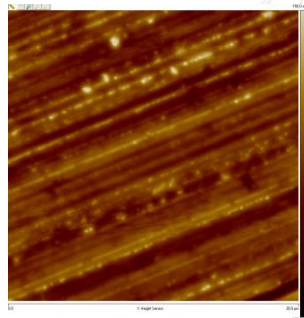
ภาพที่ ข-2 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 15 ชั้น (ต่อ)



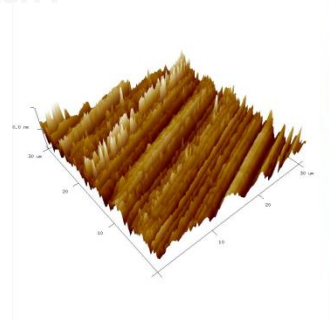
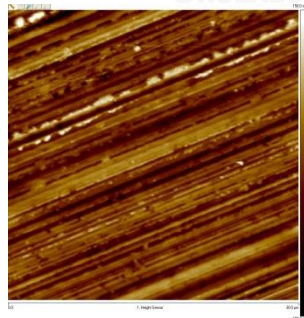
ชั้นที่ 1



ชั้นที่ 2

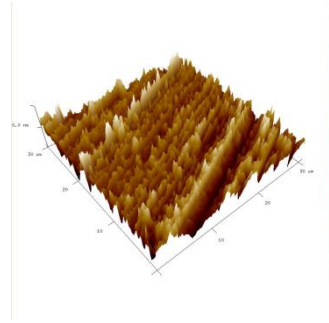
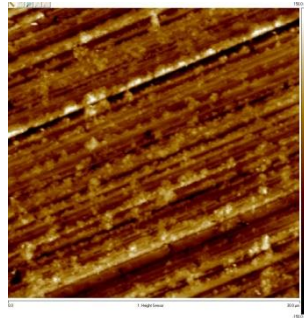


ชั้นที่ 3

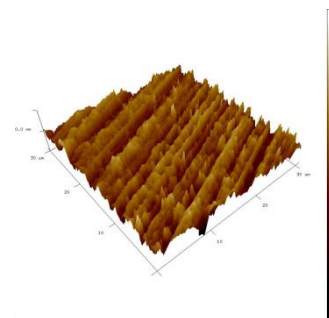
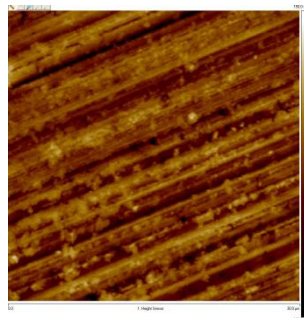


ชั้นที่ 4

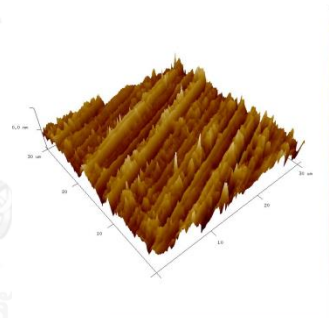
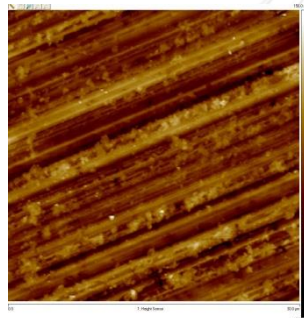
ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น



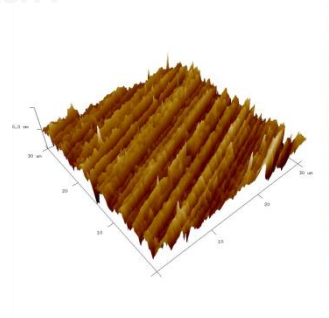
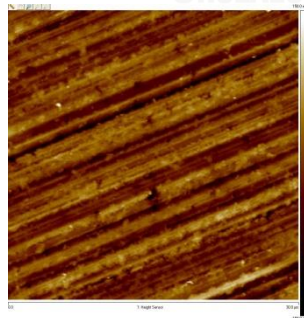
ชั้นที่ 5



ชั้นที่ 6

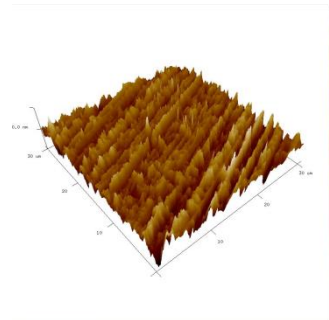
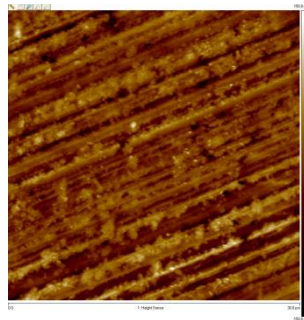


ชั้นที่ 7

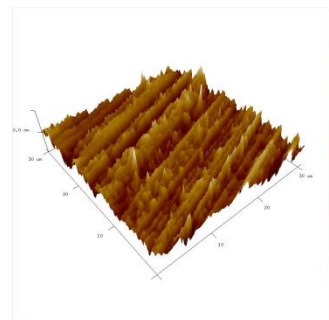
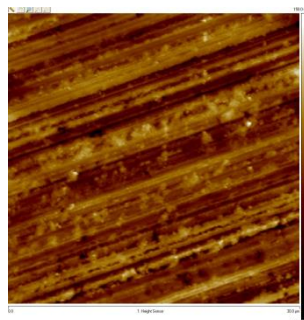


ชั้นที่ 8

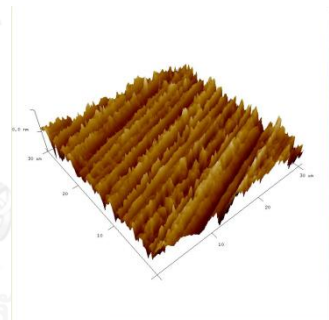
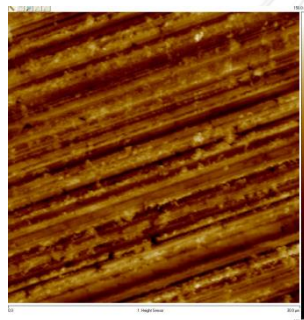
ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



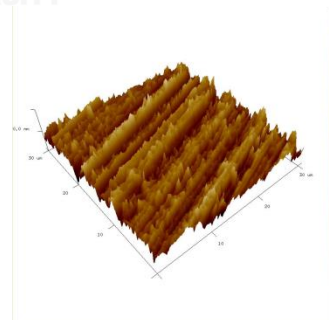
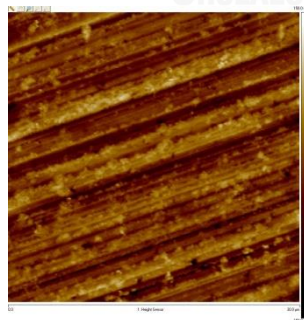
ชั้นที่ 19



ชั้นที่ 10

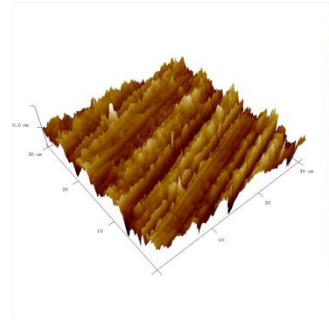
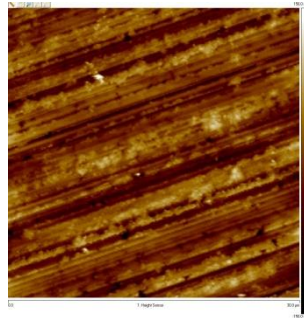


ชั้นที่ 11

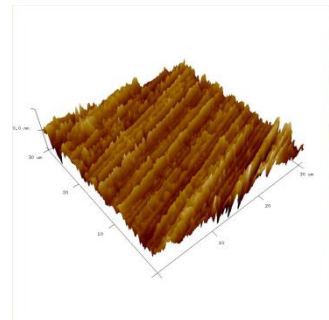
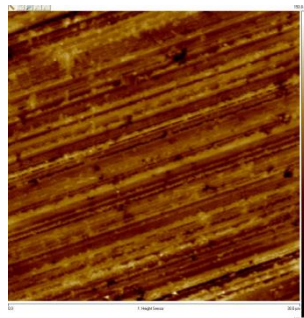


ชั้นที่ 12

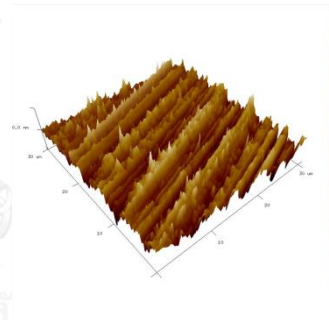
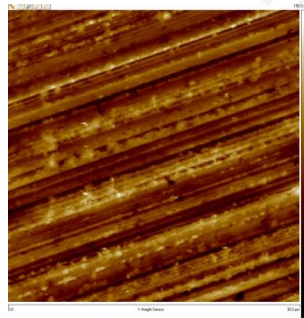
ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



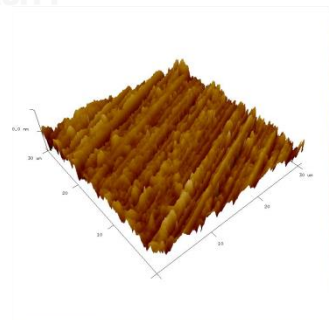
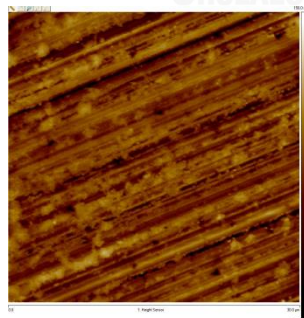
ชั้นที่ 13



ชั้นที่ 14

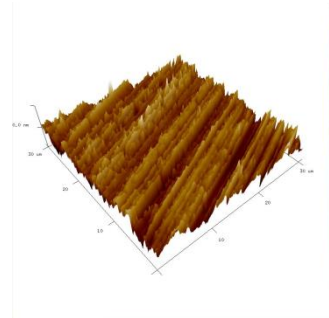
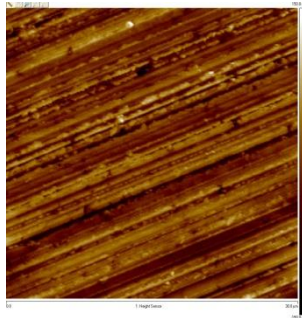


ชั้นที่ 15

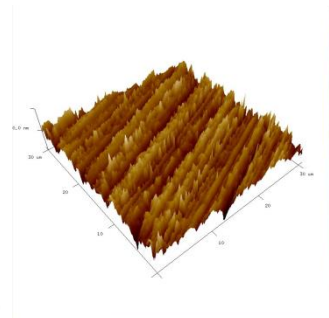
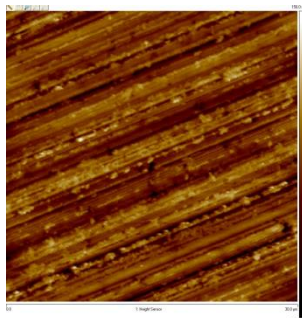


ชั้นที่ 16

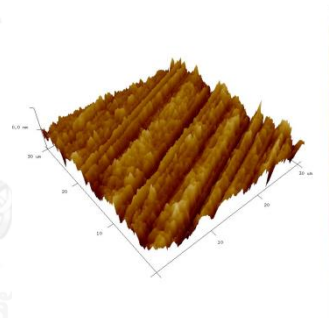
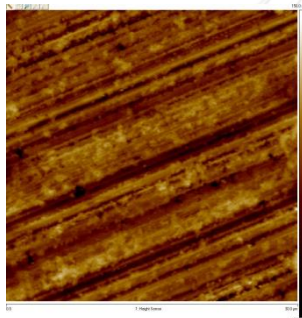
ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



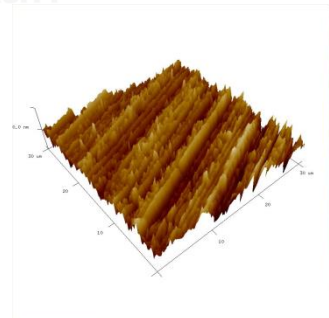
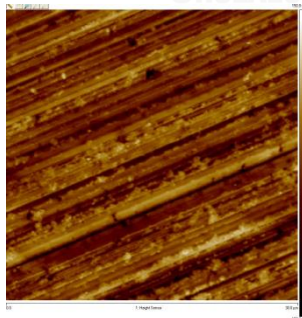
ชั้นที่ 17



ชั้นที่ 18

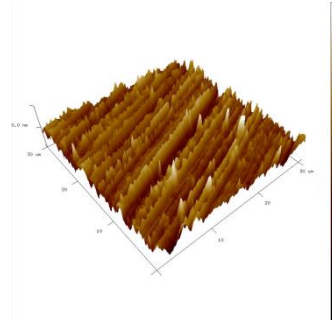
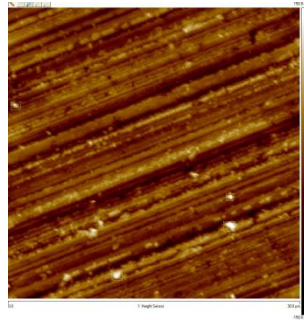


ชั้นที่ 19

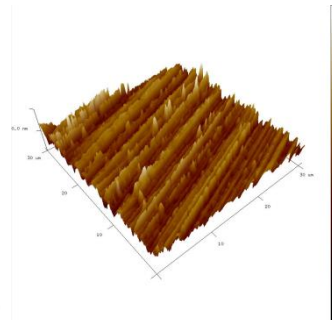
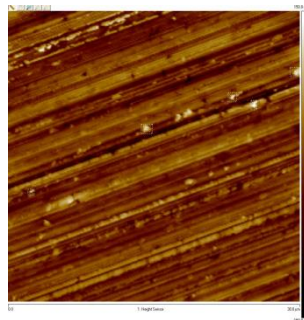


ชั้นที่ 20

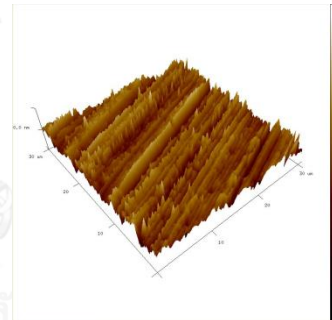
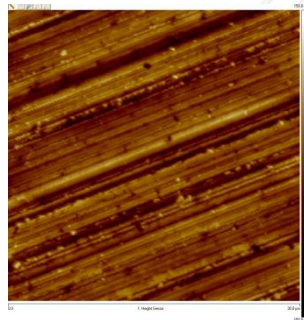
ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



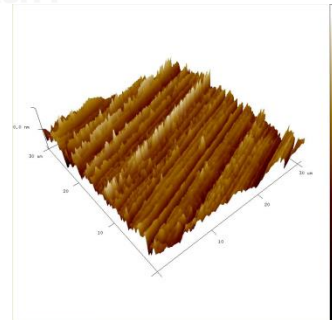
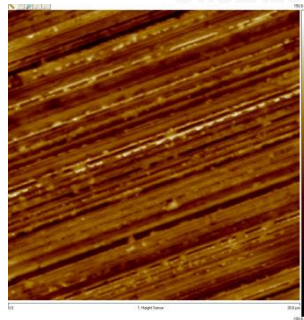
ชั้นที่ 21



ชั้นที่ 22



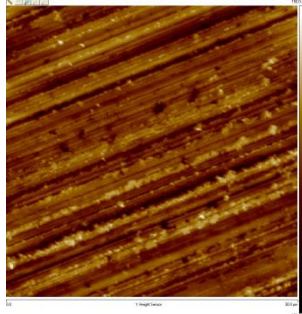
ชั้นที่ 23



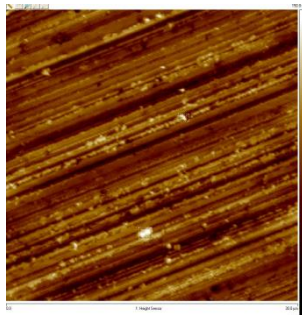
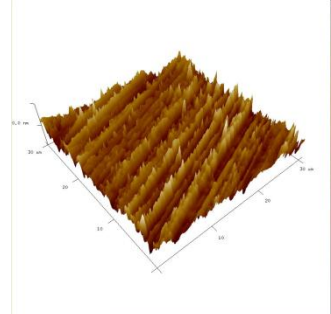
ชั้นที่ 24

ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)

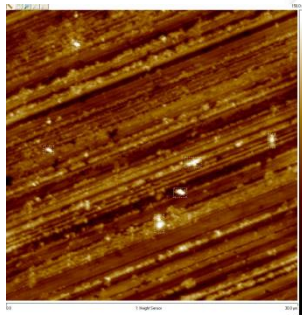
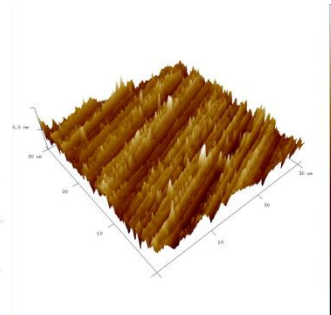




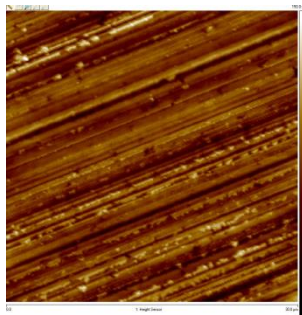
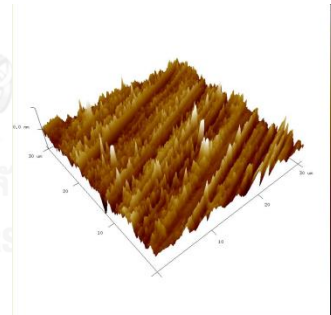
ชั้นที่ 25



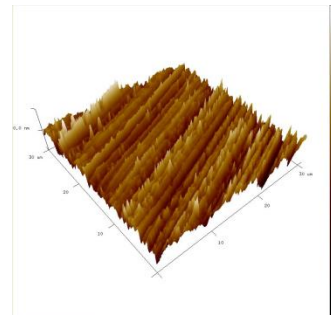
ชั้นที่ 26



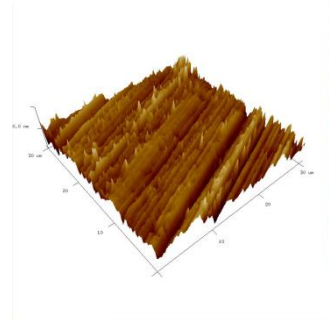
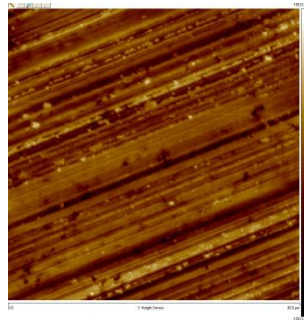
ชั้นที่ 27



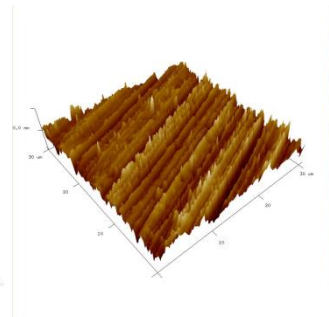
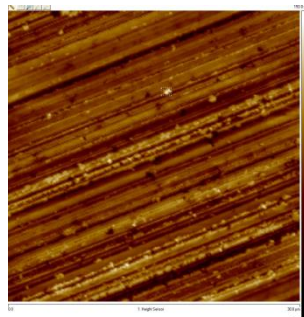
ชั้นที่ 28



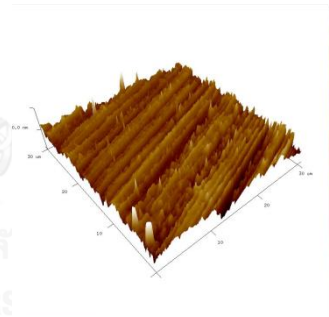
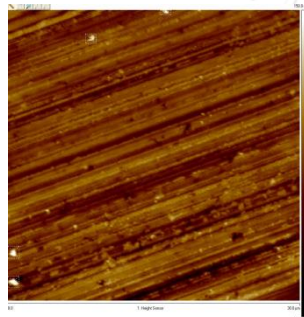
ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



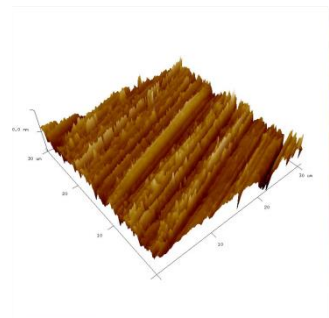
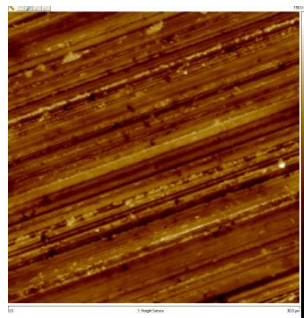
ชั้นที่ 29



ชั้นที่ 30

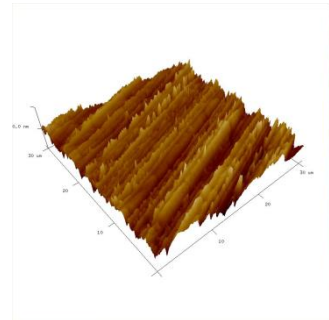
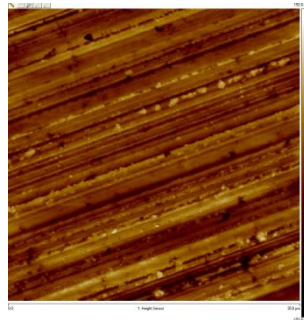


ชั้นที่ 31

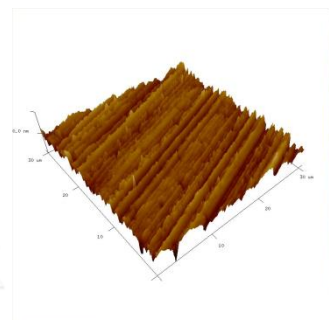
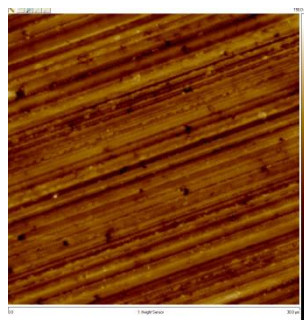


ชั้นที่ 32

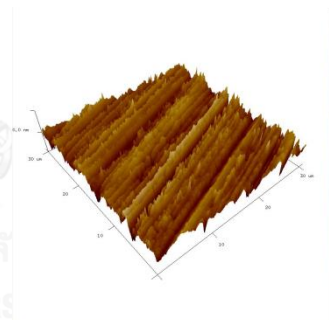
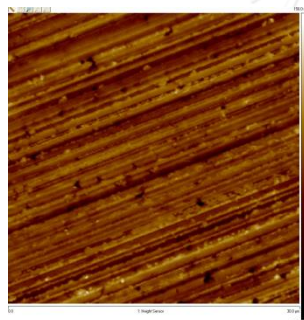
ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



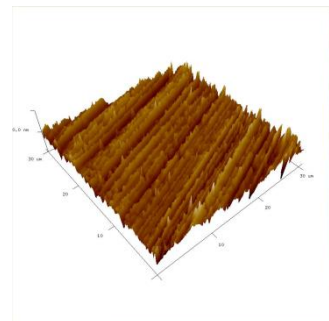
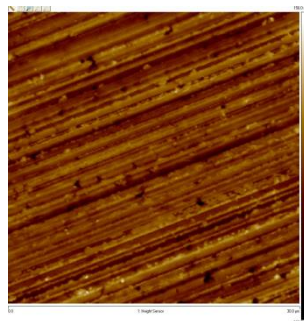
ชั้นที่ 33



ชั้นที่ 34

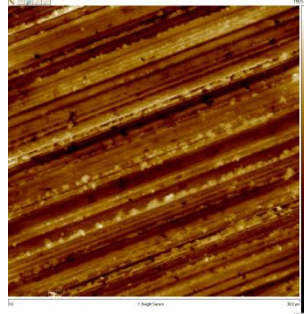


ชั้นที่ 35

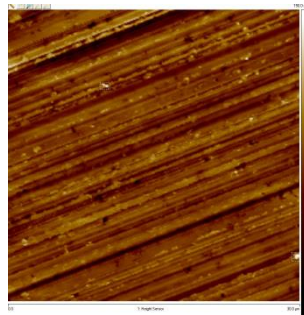
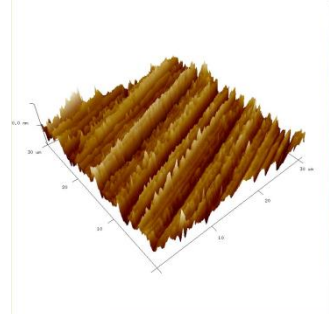


ชั้นที่ 36

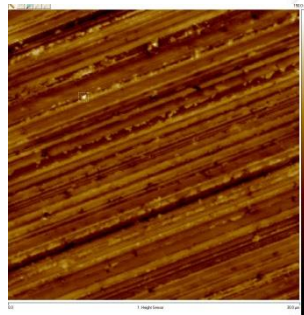
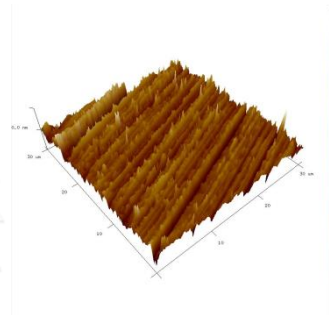
ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



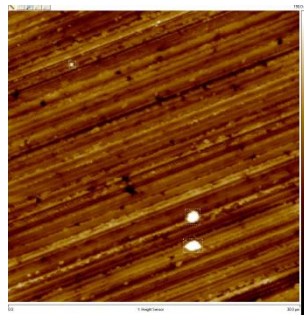
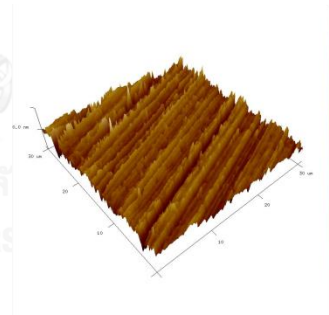
ชั้นที่ 37



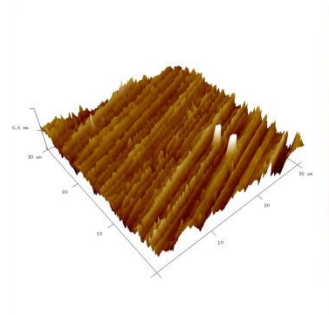
ชั้นที่ 38



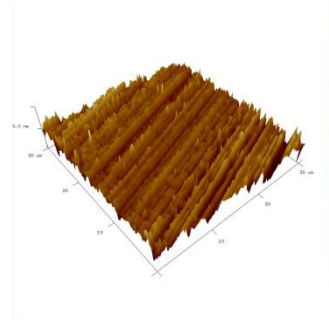
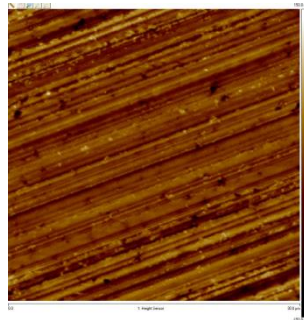
ชั้นที่ 39



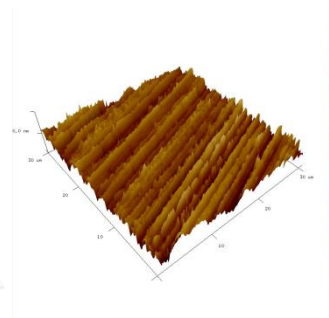
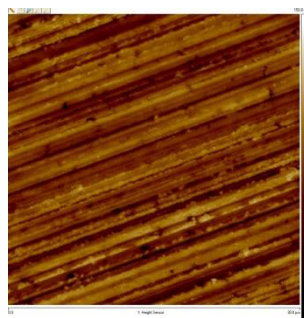
ชั้นที่ 40



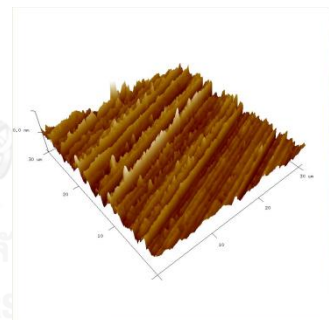
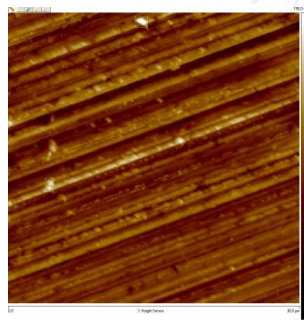
ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



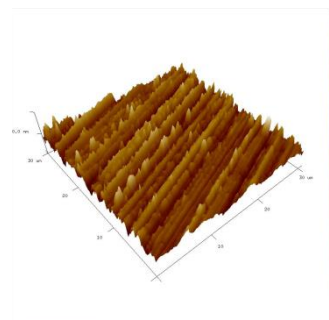
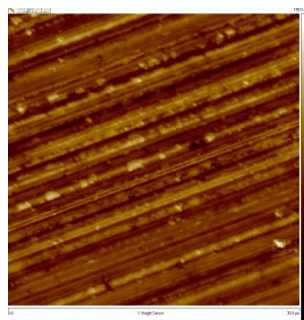
ชั้นที่ 41



ชั้นที่ 42

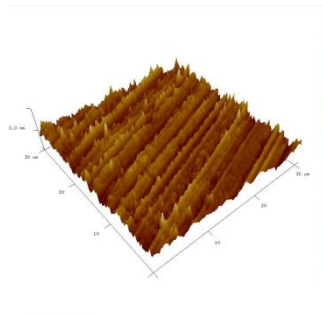
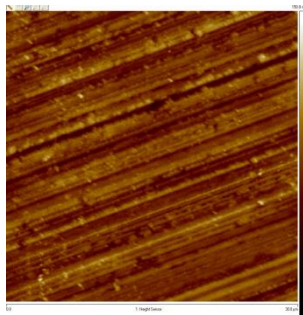


ชั้นที่ 43



ชั้นที่ 44

ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียรไนด้วยล้อเจียรไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียรไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



ชั้นที่ 45

ภาพที่ ข-3 ลักษณะผิวของอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 45 ชั้น หลังถูกเจียระไนด้วยล้อเจียระไน หลังลับคมแบบปกติต่อจากการใช้เจียระไนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ 30 ชั้น (ต่อ)



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสีบสกุล ยศพิทักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 14 ตุลาคม พ.ศ.2534 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช เป็นบุตรของนางจิรวรรณ ยศพิทักษ์ และนายชัยศิลป์ ยศพิทักษ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2557

