

ความเค้นตกค้างบนผิววัสดุผสม Al_2O_3 -TiC จากกระบวนการเจียระไน



นางสาวสินีนารถ ธรรมสุนทร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

ปีการศึกษา 2556

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตที่ส่งมาขึ้นทะเบียนที่สำนักงานวิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

RESIDUAL STRESS ON Al_2O_3 -TiC COMPOSITE MATERIAL IN GRINDING PROCESS

Miss Sineenart Thumsoontorn



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความเค้นตกค้างบนผิววัสดุผสม Al_2O_3-TiC จากกระบวนการเจียระไน
โดย	นางสาวสินีนารถ ธรรมสุนทร
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชชาย เหลืองวรานันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัชชาย เหลืองวรานันท์)

.....กรรมการ
(ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ ออยุธยา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(จักรกฤษ สุภาวสุทธิ์)

สินีนารถ ธรรมสุนทร : ความเค้นตกค้างบนผิววัสดุผสม Al_2O_3-TiC จากกระบวนการเจียรระโน. (RESIDUAL STRESS ON Al_2O_3-TiC COMPOSITE MATERIAL IN GRINDING PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.ธชาชาย เหลืองวรานันท์, 74 หน้า.

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาความเค้นตกค้างบนผิวของวัสดุผสมอะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์ที่ใช้เป็นฐานรองของหัวอ่าน-เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) ปัญหาที่พบในกระบวนการผลิต คือการโก่งงอ หลังจากตัดแผ่นเวเฟอร์อะลูมินา-ไททาเนียมคาร์ไบด์ออกเป็นแท่งบางๆ เรียกว่า “สไลเดอร์ (slider)” และ ในระหว่างการขัดเจียรระโนสไลเดอร์ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะใช้ผงขัดเพชรและวัสดุแผ่นขัดเจียรระโนแบบต่างๆกัน เพื่อให้ได้ความหนาและคุณภาพของผิวสไลเดอร์ที่ต้องการ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อให้เข้าใจผลของความเค้นตกค้างที่เกิดจากกระบวนการเจียรระโนว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความโก่งงอของสไลเดอร์อย่างไร รวมทั้งหาวิธีการที่เหมาะสมในการวัดปริมาณความเค้นตกค้างที่ผิวสไลเดอร์ที่มีขนาดเล็กและบางเป็นข้อจำกัด โดยเทคนิค $\sin^2\psi$ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ (X-ray diffraction) สามารถประเมินค่าเฉลี่ยความเค้นตกค้างในระดับมหภาคจากความเครียดของระนาบผลึกที่เปลี่ยนแปลงไปได้ และใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงร่วมกับเซนเซอร์แสงวัดระยะโก่งงอของสไลเดอร์ ผลการวิจัยเบื้องต้นพบว่า ความเค้นตกค้างบนเฟสไททาเนียมคาร์ไบด์จะมีค่ามากกว่าบนเฟสอะลูมินาเสมอ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดต่ำ และใช้เวลาในการทดสอบน้อย ผู้วิจัยจึงเลือกวัดปริมาณความเค้นตกค้างบนเฟสไททาเนียมคาร์ไบด์เป็นตัวแทนวัสดุผสม โดยความเค้นตกค้างบนเฟสอะลูมินาจะมีค่าประมาณ 50-70% ของเฟสไททาเนียมคาร์ไบด์ที่วัดได้ ผลการทดลองเมื่อทดสอบบนผิวสไลเดอร์ พบว่า ความเค้นตกค้างของเฟสไททาเนียมคาร์ไบด์ที่ความลึก 1.4 -17.4 ไมครอนจากผิว มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 70 MPa ด้านที่ถูกขัดเจียรระโนจะมีปริมาณความเค้นอัดสูงกว่าเสมอมีค่า 34 - 70 MPa ส่วนด้านที่ไม่ได้ถูกขัดเจียรระโนจะมีปริมาณความเค้นตกค้างแบบอัดในปริมาณต่ำมีค่า 0 - 7 MPa พบว่าปริมาณความเค้นตกค้างที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากกระบวนการขัดสามารถส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะความเค้น (Stress State) ภายในสไลเดอร์ได้ ความแตกต่างของปริมาณความเค้นตกค้างที่ผิวด้านบนและล่างของสไลเดอร์และการโก่งงอของกระบวนการส่วนใหญ่ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ยกเว้นกระบวนการหนึ่งที่ทำให้พื้นผิวมีสถานะความเค้นแตกต่างกับกระบวนการอื่นๆ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิคการทดสอบความแข็งแบบหัวกดแบบวิกเกอร์ จากลักษณะรอยแตกที่ปรากฏ ข้อเสนอแนะ สำหรับการใช้นิเทศ $\sin^2\psi$ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์เพื่อวัดความเค้นตกค้างบนผิวสไลเดอร์จากกระบวนการเจียรระโนหัวอ่าน-เขียน ควรมีความละเอียดของเครื่องมือวัดอยู่ที่ระดับ $\Delta 2\theta$ เท่ากับ 0.0001 องศา (หรือ ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370362321 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS: RESIDUAL STRESS / GRINDING / AL₂O₃-TiC COMPOSITE

SINEENART THUMSOONTORN: RESIDUAL STRESS ON Al₂O₃-TiC COMPOSITE MATERIAL IN GRINDING PROCESS. ADVISOR: BOONRAT LOHWONGWATANA, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. TACHAI LUANGVARANUNT, Ph.D., 74 pp.

This research study surface residual stress on Al₂O₃-TiC composite used as substrate for Read-Write head in hard disk drive. In hard disk drive manufacturing, Al₂O₃-TiC composite wafer were cut into designated bar shape by slicing, so call "slider", then subsequence grinding processes to removal material thickness and lapping processes for finishing surface. Finally slider bar were part into singulated read-write head. These processes are gently removed material surface layer of slider again and again from micro-scale to nano-scale, these required overall specification and tolerance have been pushed towards the limits of materials science and metrology. Residual stress induced by these processes causes slider to bow. It effects to reliability of slider. The aim of this research is to understand how residual stress influenced to bow behavior and to suggest proper techniques for measuring residual stress, especially in slider level. X-ray diffraction with $\sin^2\psi$ technique was used to analyze residual stress. Average macro-residual stress could determine from evaluating strains in lattice structures. Slider bow were measured by optical microscope with light sensor. The results reveal that residual stress on Al₂O₃ phase is always about 50%-70% less than those on TiC phase. Measured data qualities, i.e standard deviation and analysis time, obtained from TiC phase is better. It is suggest that TiC phase should be used as a representative for residual stress measurement for Al₂O₃-TiC composite. Residual stresses on grinded and lapped surfaces of sliders are always high compressive stresses, values are about 34-70 MPa. While no-treat surfaces of sliders showed low residual stresses about 0-7 MPa. Delta residual stress between backside and front side of each process mostly showed the same trend with slider bow, except one process; so call B4, where generate significantly different stress states on slider surface from others. It could be observed uniquely crack characteristic when created indentation and crack by Vickers hardness test. In suggestion, $\Delta 2\theta$ resolution for residual stress analysis on slider surface by X-ray diffraction with $\sin^2\psi$ technique should be 0.0001 (or 4 digits resolutions)

Department: Metallurgical Engineering

Field of Study: Metallurgical Engineering

Academic Year: 2013

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา จาก ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ชี้แนะแนวทางการทำวิจัย อีกทั้งสละเวลาให้คำปรึกษาด้วยความเต็มใจ ตลอดจน ช่วยตรวจสอบและแก้ไขงานเขียน จนผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จ ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์ ที่ร่วมให้คำปรึกษาและให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับผลของงานวิจัย และให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยในเรื่องต่างๆ ด้วยความเมตตาเสมอมา ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร และ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา ที่สละเวลา ในฐานะประธานกรรมการและกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ และได้กรุณาตรวจสอบจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้อำนวยการอาวุโส คุณจักรกฤษ สุภาวสุทธิ์ และ คุณธีระ แยมกลิ่น วิศวกรพี่เลี้ยง จากบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่กรุณาแนะนำกระบวนการผลิต และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือการผลิตและทดสอบชิ้นงาน ขอขอบพระคุณ คุณกฤษดา ชาญชนะโสภณ และ คุณสุดารัตน์ คงมี ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือประสานงาน และให้ความรู้ เกี่ยวกับเครื่องมือทดสอบ ขอขอบพระคุณอย่างยิ่ง

งานวิจัยนี้จะไม่สามารดดำเนินไปได้ หากไม่ได้รับความสนับสนุนด้านทุนการทำวิจัยและ ทุนการศึกษา จากท่านผู้มีพระคุณ ดังต่อไปนี้ 1) ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุน รัชดาภิเษกสมโภช 2) ทุนโครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับ ภาคอุตสาหกรรม (NUI-RC) 3) บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด 4) หน่วยปฏิบัติการ วิจัยโลหะนวัตกรรม

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจและให้ความ ช่วยเหลือสนับสนุนด้วยความรักและความเข้าใจ มาโดยตลอด ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ขอมอบความดีความชอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกๆท่าน

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	4
2.2 กระบวนการตัดและการขัดเจียรระโน.....	5
2.3 กระบวนการขัดเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สไลเดอร์.....	6
2.4 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดสำหรับวัสดุยึดหยุ่น.....	7
2.5 สภาวะความเค้น.....	9
2.6 หลักการแปลงพิกัด (Coordinate transformation).....	11
2.7 การหาค่ามอดูลัสและอัตราส่วนของปัวซองในวัสดุผสม.....	12
2.8 ความเค้นตกค้าง.....	15
2.9 แบบจำลองความเค้นตกค้างในวัสดุผสม.....	16
2.10 การวัดปริมาณความเค้นตกค้าง.....	18
2.11 การวัดปริมาณความเค้นตกค้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ (X-ray diffraction).....	21
2.12 การวัดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ.....	28
2.13 อิทธิพลของความเค้นตกค้างต่อกลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics).....	30
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	33
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	33

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง	33
3.3 วิธีการทดลอง	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง	43
4.1. การคำนวณปริมาณความเค้นตกค้างที่เกิดจากกระบวนการกดอัดด้วยความร้อนและความดัน สถิตแบบเท่ากันทุกทิศทาง	43
4.2 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์.....	44
4.3 ผลการวัดปริมาณความเค้นตกค้างบนผิววัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	45
4.4 ผลการวัดความโค้งงอของสไลเดอร์.....	49
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเค้นตกค้างกับความโค้งงอ.....	50
4.6 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบหัวกดวิกเกอร์.....	51
4.7 ผลการเปรียบเทียบความเค้นตกค้างกับระยะรอยแตก.....	56
4.8 ผลการวัดความหยาบผิว	57
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวกับผลต่างความเค้นตกค้าง.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	59
รายการอ้างอิง	60
ภาคผนวก ก ผลการวัดปริมาณความเค้นตกค้างจากห้องทดสอบเอ บี และ ซี	64
ภาคผนวก ข ข้อมูลและกราฟ $\sin^2 \psi$ จากห้องทดสอบเอ บี และ ซี	65
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณและกราฟระยะความลึกวิเคราะห์ของวิธีการเลี้ยวเบนของ เอกซเรย์.....	70
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณปริมาณความเค้นตกค้าง.....	71
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	74

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ยืดหยุ่นชนิดต่างๆ	8
ตารางที่ 2.2 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และ อัตราส่วนของปัวซอง ของอะลูมินา ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และ วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	14
ตารางที่ 2.3 เทคนิคการวัดปริมาณความเค้นตกค้างแบบต่างๆ	19
ตารางที่ 2.4 ค่า K_x และ G_x สำหรับการคำนวณ ระยะความลึกวิเคราะห์	28
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดเทคนิคการติดตั้งอุปกรณ์ และการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการวัดปริมาณ ความเค้นตกค้างด้วยวิธี $\sin^2 \psi$	38
ตารางที่ 3.2 แผนภูมิการทดลองศึกษาการวัดปริมาณความเค้นตกค้างด้วยการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ ด้วยวิธี $\sin^2 \psi$	41
ตารางที่ 3.3 แผนภูมิการทดลองวัดระยะรอยแตกที่สร้างด้วยหัวกดวิกเกอร์	42
ตารางที่ 4.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้คำนวณปริมาณความเค้นตกค้างในเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์จาก กระบวนการกัดด้วยความร้อนและความดันสถิตแบบเท่ากันทุกทิศทาง	43
ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็ง (Hardness) ระยะรอยแตก (c) ความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC})	52
ตารางที่ 4.3 ลักษณะรอยแตก	54
ตารางที่ 4.4 ผลการวัดความหยาบผิว	57

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 กระบวนการตัด-ขัดเจียรระโนแบบต่างๆ	6
ภาพที่ 2.2 กระบวนการขัดเจียรระโนสไลเดอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์	7
ภาพที่ 2.3 การระบุตำแหน่งพื้นผิวด้านหน้าและพื้นผิวด้านหลังของหัวอ่าน-เขียน.....	7
ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบความเค้นแบบสามมิติ	9
ภาพที่ 2.5 การแปลงพิกัดสำหรับเวกเตอร์ S.....	12
ภาพที่ 2.6 ชนิดของความเค้นตักข้างแบ่งตามระดับสเกล (Scale).....	16
ภาพที่ 2.7 แบบจำลองความเค้นตักข้างในอนุภาคและเนื้อพื้นสำหรับวัสดุผสมเนื้อพื้น เซรามิกแก้ว	18
ภาพที่ 2.8 หลักการวัดความเค้นตักข้าง (σ_0) และ ที่พิกัด $\phi\psi$ ของชิ้นงาน	22
ภาพที่ 2.9 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ $\sin^2 \psi$ กับระยะระหว่างระนาบ (d) ที่เป็นไปได้	24
ภาพที่ 2.10 ระบบมุมของอุปกรณ์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (Diffractometer)	26
ภาพที่ 2.11 วิธีโอเมกา (ω -Method) สำหรับระบบแกนดิฟแฟรกโตมิเตอร์แบบนอน	26
ภาพที่ 2.12 ทิศทางการหมุนชิ้นงานเป็นมุม ψ ในทิศทาง $-\psi$ หรือ $+\psi$ สำหรับวิธีโอเมกา.....	27
ภาพที่ 2.13 วิธีไค (χ -Method) สำหรับระบบแกนดิฟแฟรกโตมิเตอร์แบบนอน	27
ภาพที่ 2.14 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงติดตั้งเซนเซอร์แสง	29
ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างข้อมูลการวัดความโค้งงอของสไลเดอร์	29
ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดความหยาบของพื้นผิว	30
ภาพที่ 2.17 ระบบรอยแตกแนวรัศมี	31
ภาพที่ 2.18 การวัดขนาดเส้นทแยงมุมและรอยแตกของรอยกด	32
ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นบาง.....	34
ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานสไลเดอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ถูกเลือกออกมาจากกระบวนการเจียรระโน ปี 1 ถึง ปี 5.....	35
ภาพที่ 3.3 ตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดบนแกน Y บนสไลเดอร์.....	39
ภาพที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงติดตั้งเซนเซอร์แสง และจุดสัญลักษณ์เครื่องหมายวง กึ่งกลางสไลเดอร์ ที่ใช้ในการวัดความโค้งงอ	39
ภาพที่ 4.1 อัตราส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคต่อความเค้นตักข้างเนื่องจากความร้อน	44
ภาพที่ 4.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์	45
ภาพที่ 4.3 ความเค้นตักข้างของเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ อะลูมินา และ วัสดุผสม	46
ภาพที่ 4.4 ความเค้นตักข้างบนพื้นผิวด้านหลังและด้านหน้าของสไลเดอร์จากห้องทดสอบปี.....	47

ภาพที่ 4.5 ความเค้นตกค้างบนพื้นผิวด้านหลังและด้านหน้าของสไลเดอร์จากห้องทดสอบซี	48
ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความต่างของความเค้นตกค้างระหว่างผิวด้านล่างและด้านบน ของข้อมูล จากห้องทดสอบบี และห้องทดสอบซี	49
ภาพที่ 4.7 ระยะโก่งงอของสไลเดอร์หลังกระบวนการเจียระไน ปี 1 ปี 2 ปี 3 ปี 4 และ ปี 5	50
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบความต่างของความเค้นตกค้างกับระยะโก่งงอของสไลเดอร์	51
ภาพที่ 4.9 แบบจำลองทำนาย ผลต่างความเค้นตกค้างบนพื้นกับระยะการโก่งงอ ปี 1 ปี 2 ปี 3 และ ปี 5.....	52
ภาพที่ 4.10 แผนภูมิแบบกล่องของข้อมูลเส้นทแยงมุมและรอยแตกของพื้นผิวด้านหลัง.....	53
ภาพที่ 4.11 แผนภูมิแบบกล่องของข้อมูลระยะเส้นทแยงมุมและรอยแตกของพื้นผิวด้านหน้า.....	54
ภาพที่ 4.12 ภาพขยายลักษณะรอยแตก รอยแตกตามขอบเกรน และรอยแตกผ่าเกรน.....	55
ภาพที่ 4.13 ภาพขยายลักษณะรอยแตกที่มีการหลุดตัวที่มุมรอยกด และรอบรอยแตก.....	55
ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบความเค้นตกค้างกับระยะรอยแตกของพื้นผิวด้านหลัง	56
ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบความเค้นตกค้างกับระยะรอยแตกของพื้นผิวด้านหน้า.....	56
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเค้นตกค้างกับความหยาบผิว.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ในยุคข้อมูลข่าวสาร (Information Age) ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถือเป็นอุปกรณ์สำคัญที่ใช้เก็บข้อมูล ปัจจุบันมีการพัฒนาฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้มีความสามารถในการจุข้อมูลได้สูงขึ้นในขณะที่ลดขนาดลงอย่างมาก เพื่อให้มีน้ำหนักเบาและใช้พื้นที่น้อยที่สุด อุปกรณ์ทางกลภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงจำเป็นต้องทำการออกแบบให้มีขนาดเล็กมากรวมทั้งต้องการสมรรถนะสูง ได้มีการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ ซึ่งประกอบด้วย ขั้นตอนการผลิตหลักๆ คือการผลิตแผ่นเวเฟอร์ (Wafer fabrication) กระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนข้อมูล (Slider fabrication) กระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (HGA-Head Gimble Assembly) กระบวนการผลิตชุดประกอบหัวอ่าน-เขียนสำเร็จ (HSA-Head stack Assembly) และ กระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive assembly) ในการผลิตแผ่นเวเฟอร์ที่ใช้เป็นฐานรอง ฐานรองนี้จะถูกตัดเจียรระโนออกเป็นแท่ง บางๆ ซึ่งด้านหนึ่งจะถูกปลุกอุปกรณ์หัวอ่าน-เขียนข้อมูล (Read-Write head) ลงไป จึงเรียกแท่งหัวอ่าน-เขียนข้อมูล นี้ว่า สไลเดอร์ (Slider) แผ่นเวเฟอร์นี้ทำมาจากวัสดุที่มีความทนทานต่อการขัดสี ทนการสึกหรอสูง และเสียรูปได้ยาก พบว่า วัสดุอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (Al_2O_3-TiC) หรือ อัลทิก (ALTiC) ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุฐานรองเนื่องจากสมบัติ ข้างต้น สำหรับการการผลิตแผ่นเวเฟอร์ ขณะนี้ยังไม่มีการผลิตในระดับอุตสาหกรรมในประเทศไทยเนื่องจากกระบวนการผลิตนั้น ค่อนข้างยากและซับซ้อน ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง โดยเฉพาะการปลุกอุปกรณ์ต่างๆลงบนฐานรอง ซึ่งมีขั้นตอนย่อยหลายขั้นตอน โดยสังเขปประกอบด้วย การปลุกวัสดุพื้นรอง การปลุกอุปกรณ์อ่านข้อมูล และกระบวนการผลิตแผ่นเชื่อมสัญญาณ ด้วย กระบวนการไอระเหยทางกายภาพ (PVD) กระบวนการไอระเหยทางเคมี (CVD) และ ใช้เทคนิคการสกัดลิโธกราฟี ทำซ้ำไปซ้ำมา ตามการออกแบบเพื่อให้เกิดเป็นวงจรทำงานและรูปทรงของหัวอ่าน-เขียน ก่อนผ่านกระบวนการทดสอบด้วยไฟฟ้าและส่งสู่กระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนต่อไป

ประเทศไทยนั้น ถือเป็นฐานการผลิตแหล่งใหญ่ที่สุดในการผลิตและประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive assembly) ของโลก ปัจจุบันอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีมูลค่าการส่งออกคิดเป็นอันดับ 1 ใน 5 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ นับว่ามีความสำคัญต่อภาคเศรษฐกิจของประเทศไทยอย่างยิ่ง มีการจ้างงานอย่างกว้างขวาง ทำให้คนในประเทศมีรายได้ ดังนั้น อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไทย ควรมีความสามารถในการผลิต และพัฒนาผลิตภัณฑ์รวมถึงใช้พลังงานและทรัพยากรต่างๆ ภายในประเทศให้คุ้มค่าที่สุด สิ่งที่ทำท้ายก็คือ เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิต และประกอบกลไกทางกลที่มีความละเอียดอ่อนสูง การพัฒนาองค์ความรู้แก่บุคลากรให้มีความรู้ความเข้าใจทางเทคนิคในเชิงลึก เมื่อประยุกต์ใช้ร่วมกับประสบการณ์การทำงานจริงในภาคอุตสาหกรรม จะทำให้บุคลากรมีความสามารถในการแก้ปัญหาต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วและสามารถกำจัดรากของ

ปัญหาอย่างตรงจุด ทำให้ไม่เกิดปัญหาซ้ำซาก รวมถึงสามารถประยุกต์ใช้ความรู้ในการแก้ปัญหาต่อสถานการณ์ใหม่ๆ ได้โดยไม่ต้องลองผิดลองถูก ไม่ต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศที่อาจต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูงกว่ามาก การเริ่มพัฒนาอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไทยอย่างจริงจังให้พึ่งพาตนเองได้จึงมีความสำคัญมาก เป็นการสร้างโอกาสในการเรียนรู้ เมื่อมีองค์ความรู้เพียงพอ ก็จะสามารถพัฒนาเทคโนโลยีเป็นของตนเองได้ในอนาคต เพื่อประโยชน์โดยรวมของประเทศ จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้เขียนจึงมีความสนใจที่จะศึกษาปัญหา ที่เกิดจากกระบวนการผลิตหัวอ่าน-เขียนข้อมูล ในส่วนของกระบวนการตัดเจียรระไนสไลเดอร์ กับบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (บางปะอิน) จำกัด กระบวนการขัดเจียรระไน (Grinding) เป็นกระบวนการที่สำคัญ ในการเจียรระไนแต่งผิววัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ทำให้เกิดเป็นรูปร่างของสไลเดอร์และสร้างคุณภาพของพื้นผิวตามแบบ ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อการไถงของสไลเดอร์ (Slider Bow) และปริมาณความเค้นตกค้างที่ผิวที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการด้วย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อให้มีความเข้าใจถึงปริมาณความเค้นตกค้างบนผิวของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ซึ่งเกิดจากกระบวนการเจียรระไน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ โดยใช้เทคนิคที่เหมาะสมในการวัดปริมาณความเค้นตกค้างบนวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาวิจัยทำภายใต้สมมุติฐานว่า วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ มีสมบัติทางกลในระดับมหภาคที่มีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (isotropic) และวัสดุผสมที่ศึกษานี้ไม่มีการชอบเรียงตัวในบางทิศทาง (Preferred-orientation)

1.3.2 การศึกษาวิจัยทำภายใต้สมมุติฐานว่า วัสดุอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ มีพฤติกรรมระดับมหภาคอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Elastic Linear Region)

1.3.3 การศึกษาวิจัยทำภายใต้สมมุติฐานว่า สไลเดอร์ก่อนตัดเจียรระไนเป็นชิ้นงานที่ไม่มีความเค้นตกค้างคงอยู่ (Residual stress free) หรือ ถ้ามีก็น้อยมากจนสามารถเพิกเฉยไปได้ แต่จะทำการประมาณปริมาณความเค้นตกค้างที่เกิดจากอุณหภูมิในการขึ้นรูปผลิตแผ่นเวเฟอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยกรรมวิธีทางโลหะผง (powder metallurgy) ด้วยวิธีคำนวณทางทฤษฎีเพื่อเป็นข้อมูลประกอบเพิ่มเติม

1.3.4 การศึกษาวิจัย ทำการวิเคราะห์ปริมาณความเค้นตกค้างที่เกิดจากแรงทางกลอันเกิดจากกระบวนการเจียรระไน และ ทำการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณความเค้นตกค้างเฉพาะบนพื้นผิวเท่านั้น โดยทำการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ ด้วยด้วยเทคนิค $\sin^2 \psi$ แบบดั้งเดิม กล่าวคือ ทำการทดสอบภายใต้สมมุติฐานว่า องค์ประกอบความเค้นตกค้างในทิศตั้งฉากกับผิวชิ้นงานมีค่าเป็นศูนย์

1.3.5 ลักษณะทางกายภาพของสไลเดอร์ที่ศึกษาในการวิจัยนี้ คือ การเปลี่ยนแปลงการโค้งงอของสไลเดอร์ หลังจากผ่านกระบวนการเจียรไน

1.3.6 การศึกษาวิจัยนี้ เป็นการหาวิธีและเทคนิคสำหรับการวัดปริมาณความเค้นตกค้างที่เหมาะสมเพื่อที่จะสามารถเข้าใจว่าอิทธิพลของความเค้นตกค้างที่มีผลต่อการเกิดการโค้งงออย่างไร โดยที่จะไม่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ (parameters) ที่ใช้ในการเจียรไนที่มีผลต่อปริมาณความเค้นตกค้างและการโค้งงอ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เข้าใจถึงปริมาณความเค้นตกค้างบนผิวของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ซึ่งเกิดจากกระบวนการเจียรไน ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ ภาคอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ สามารถเลือกใช้อุปกรณ์ความรู้จากงานวิจัย เป็นแนวทางในการเลือกเทคนิคการวัดปริมาณความเค้นตกค้างไปประยุกต์ให้เหมาะสมกับสิ่งที่ต้องการศึกษาได้

บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

2.1.1 ผงอะลูมินา

อะลูมินา (Al_2O_3) เป็นสารประกอบเซรามิก ซึ่งมีโครงสร้างหลายรูป โครงสร้าง ที่เสถียร ๓ อณูหุ้มห้องและนิยมนำมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ อัลฟา-อะลูมินา ($\alpha-Al_2O_3$) และ แกมมา-อะลูมินา ($\gamma-Al_2O_3$) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเฮกซะกอนอล (Hexagonal) และคิวบิก (Cubic) ตามลำดับ สำหรับ วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เกิดจากนำผงเซรามิกชนิดอัลฟา-อะลูมินา มาเป็นสารตั้งต้น วัสดุที่ผลิตจาก อัลฟา-อะลูมินา นั้นมีสมบัติทางกลที่ดี และมีความหนาแน่นสูง นิยมใช้เป็นเนื้อวัสดุ หรือเนื้อพื้นในวัสดุผสมจำพวกซีเมน คาร์ไบด์ ซึ่งใช้เป็นวัสดุเครื่องมือสำหรับงานเจียรไนทางกล (machining tools) [1]

2.1.2 ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เป็นสารประกอบโลหะ ที่มีความแข็งสูงมักใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวเพื่อ ทนการขีดสี ทนความร้อนและการกัดกร่อน หรือใช้เป็นซีเมนคาร์ไบด์ผสมกับวัสดุเนื้อพื้นโลหะหรือ เนื้อพื้นเซรามิก [1]

2.1.3 วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

เป็นวัสดุผสม ที่มีประวัติการพัฒนามายาวนานหลายสิบปี กรรมวิธีการผลิตที่นิยม คือ กระบวนการทางโลหะผง (powder metallurgy processing) จุดเด่นของวัสดุผสมอะลูมินา- ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยกระบวนการดังกล่าว จะมีสมบัติทางกลดีเยี่ยม มีความแข็งสูง ทนต่อ การขีดสี มีความแข็งแรงต่อแรงดัดสูง ทนต่อการกัดกร่อน และทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี การใช้งานจึง นิยมนำไปใช้ในทางโทรโบโลยี (Tribology) หรือเป็นเครื่องมือขัดเจียรไนทางกล [1-4]

สมบัติทางกลของวัสดุผสมขึ้นกับโครงสร้างจุลภาค คือ ความหนาแน่นและขนาดเกรนที่ เกิดจากปัจจัยการผลิตจากกระบวนการทางผงโลหะ ได้แก่ ขนาดและอัตราส่วนของผงอะลูมินาและ ผงไทเทเนียมคาร์ไบด์ตั้งต้น สารเติมแต่ง อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบเผาผนึก ปฏิกริยาเคมี ระหว่างอะลูมินาและไทเทเนียมคาร์ไบด์สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง [1, 2]



ด้วยกรรมวิธีขึ้นรูปโลหะผง เช่น กระบวนการกดอัดด้วยความร้อน (Hot-pressing process) กระบวนการกดอัดด้วยความร้อนและความดันสถิตแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Hot Iso-static

Pressing) และกระบวนการอบเผาผนึกกดอัด (Sintering Pressing) ที่อุณหภูมิ 1250°C - 1650°C โดยใช้อัตราการให้ความร้อนสูง จะสามารถผลิตวัสดุที่มีความหนาแน่นแบบสมบูรณ์ (fully-dense)

การผลิตแผ่นเวเฟอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อนสามารถทำให้เกิดความเค้นตกค้างขึ้นได้ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient thermal expansion, CTE) ของเฟสอะลูมินาและไทเทเนียมคาร์ไบด์แตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในระหว่างการผลิต ปริมาตรโครงสร้างผลึกของทั้งสองเฟสมีการขยายและหดตัวไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความเค้นภายใน ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณความเค้นตกค้างให้เกิดน้อยที่สุดได้โดยการออกแบบและควบคุมกระบวนการผลิตแผ่นเวเฟอร์โดยผู้ผลิต

J. Echeberria และคณะ [4] ทำการศึกษากระบวนการกดอัดด้วยความร้อนและความดันสถิตแบบเท่ากันทุกทิศทางของผงอะลูมินา ที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่าไมครอน และใช้อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันการเกิดการโตของเกรน เพื่อให้ได้วัสดุอะลูมินาที่มีความหนาแน่นแบบสมบูรณ์ พบว่า ควรใช้อุณหภูมิประมาณ 1350 °C โดยให้แรงดันแรงดันที่ 0.5 – 150 MPa ในช่วงเวลาหนึ่ง

2.2 กระบวนการตัดและการขัดเจียรระโน

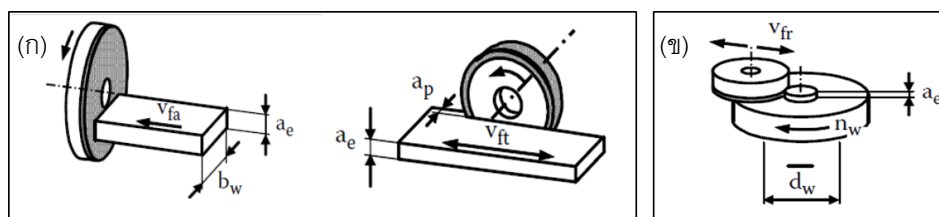
กระบวนการตัดเจียรระโน สามารถแบ่งตามทิศทางการหมุนของล้อหรือแผ่นขัดกับผิวชิ้นงานที่ถูกเจียรระโน ได้ 2 แบบ ดังนี้ [5, 6]

2.2.1 กระบวนการตัดเจียรระโนในแนวตั้ง (Vertical grinding) ได้แก่

การตัดเจียรระโนสไลด์ (Slicing) และการขัดเจียรระโนหยาบ (Grinding) ซึ่งล้อสไลด์ (Slicing wheel) และล้อเจียรระโนแบบหยาบ (Grinding wheel) นั้นจะติดใบขัดที่มีส่วนผสมของผงขัดไว้ที่ขอบล้อ เช่น ใบขัดเจียรระโนแบบหยาบชนิดอิเล็กโทรเพลตนิเกิล (Ni electroplate) ผสมผงขัดเพชรที่ความละเอียดต่างๆ โดยวิธีหมุนของล้อ จะหมุนในทิศตั้งฉากกับแนวพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการขัดเจียรระโน ซึ่งจะค่อยๆเคลื่อนที่เลื่อนบนพื้นผิวที่ต้องการเจียรระโน โดยมีของเหลวหล่อเย็น (Coolant) ฉีดระหว่างกระบวนการด้วยเพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการขัดสี ดังภาพที่ 2.1 (ก) เป็นกระบวนการที่ตัดให้ได้ขนาดหรือรูปร่างตามที่ต้องการ รวมทั้งเป็นการเตรียมผิวเพื่อการขัดเจียรระโนละเอียด (Lapping) ต่อไป

2.2.2 กระบวนการตัดเจียรระโนในแนวนอน (Horizontal grinding) ได้แก่

การขัดทำเวเฟอร์ให้บาง (Wafer thinning/Wafer back-grinding) จะเป็นการตัด โดยการขัดหยาบเพื่อลดความหนาของแผ่นเวเฟอร์ให้ได้ความบางที่กำหนด และการขัดเจียรระโนละเอียด (Lapping) โดยจะใช้ของเหลวแขวนลอยของผงขัดเพชร (Diamond Slurry) หยดลงบนแผ่นขัด (Plate) ชนิดเซรามิกหรือโลหะผสม เช่น โลหะผสมดีบุก-บิสมีส หรือ โลหะผสมดีบุก-แอนทิโมนี เป็นต้น โดยที่แผ่นขัด (plate) จะหมุนขนานกับระนาบพื้นผิวที่ต้องการทำการขัดเจียรระโน ดังภาพที่ 2.1 (ข) ให้คุณภาพพื้นผิวที่มีความเรียบ รวมถึงกระบวนการเจียรระโนขัดแต่งผิวละเอียด (Surface finishing) ด้วย



ภาพที่ 2.1 กระบวนการตัด-ขัดเจียรระโนแบบต่างๆ

(ก) การเจียรระโนแนวตั้ง ได้แก่ การตัดสไลด์และการเจียรระโนหยาบ

(ข) การเจียรระโนแนวนอน ได้แก่ การขัดทำเวเฟอร์ให้บาง และการเจียรระโนละเอียด

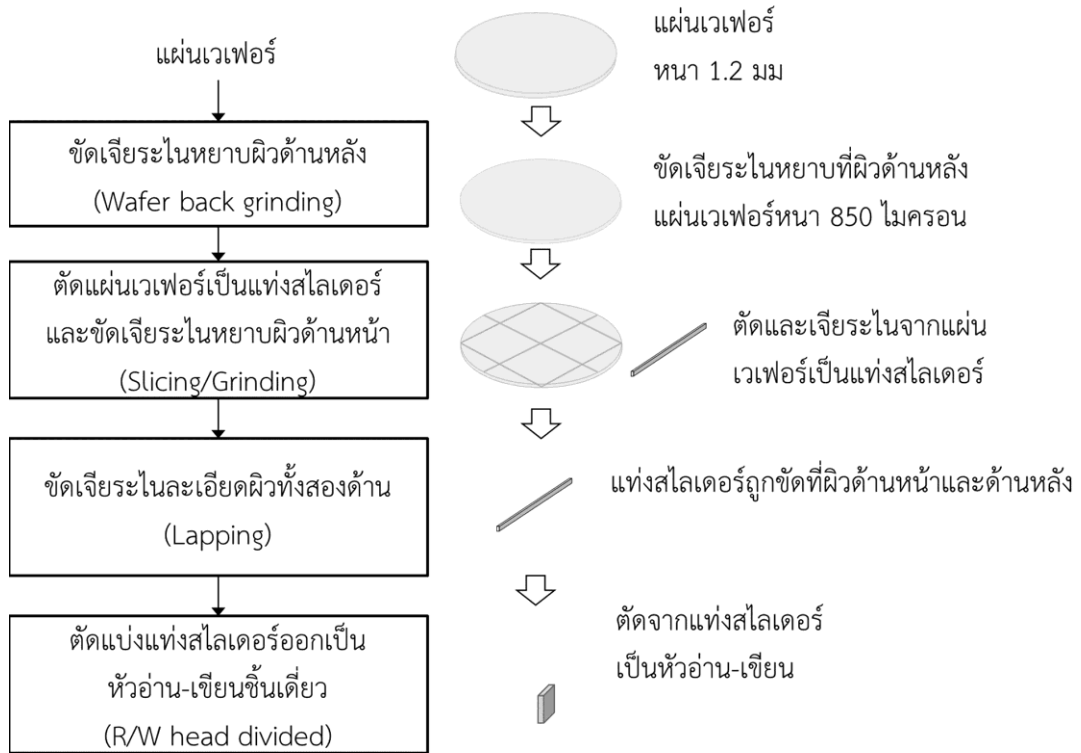
2.3 กระบวนการขัดเจียรระโนอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์สไลเดอร์

วัสดุอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ใช้เป็นฐานของหัวอ่าน-เขียนในฮาร์ดดิสก์ ถูกผลิตขึ้นจากการนำผงอะลูมินา (Al_2O_3) กับผงไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ที่มีขนาดผงเฉลี่ยอยู่ในช่วงนาโนเมตร โดยมีส่วนผสมโดยประมาณของผงอะลูมินา 65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ต่อ ผงไทเทเนียมคาร์ไบด์ 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มาทำการขึ้นรูปเป็นแผ่นเวเฟอร์ด้วยกรรมวิธีทางโลหะผง ด้วยกระบวนการกดอัดด้วยความร้อนและความดันสถิตแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Hot Iso-static Pressing) ทำให้ได้วัสดุที่มีความหนาแน่นแบบสมบูรณ์ (fully-dense) มีสมบัติทางกลที่ดี ความแข็งสูง มีความแข็งแรงต่อแรงดัดสูง และทนการขัดสีได้ดี เมื่อผ่านกระบวนการปลุกวงจรหัวอ่าน-เขียนแล้ว จะถูกนำมาตัดเจียรระโนออกเป็นแท่งสไลเดอร์ต่อไป

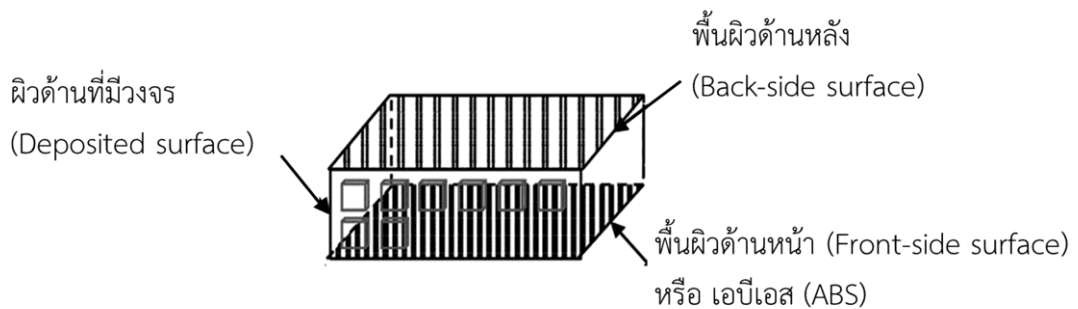
ในกระบวนการผลิตฐานรองวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในงานวิจัยนี้ แผ่นเวเฟอร์ที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร จะถูกขัดเจียรระโนแต่งผิวด้านหลัง (Backside grinding) เพื่อลดขนาดความหนาจนถึง 850 ไมครอน [1] หลังจากนั้น แผ่นเวเฟอร์จะถูกตัดแบ่งเป็นชิ้นและตัดสไลด์อีกครั้งเป็นแท่งสไลเดอร์ซึ่งในสไลเดอร์หนึ่งจะประกอบด้วยสไลเดอร์หลายชิ้น แท่งสไลเดอร์นี้จะถูกตัดและเจียรระโนหยาบที่ผิวด้านหน้า (Slicing and Grinding) หลังจากนั้นจะถูกส่งไปขัดเจียรระโนละเอียดผิวทั้งสองด้าน เริ่มจากการขัดผิวเจียรระโนที่ความละเอียดน้อยที่ผิวด้านหลัง (Back-side lapping) ครั้งหนึ่งก่อน ผิวด้านหลังนี้จะถูกขัดเจียรระโนที่ความละเอียดมากอีกครั้ง (Fine lapping) แล้วจึงถอดออกจากที่จับชิ้นงานเพื่อขัดผิวด้านหน้า (Front-side surface) ให้ได้มีความเรียบของพื้นผิวตามมาตรฐานการผลิต โดยทำการขัดเจียรระโนที่ความละเอียดสูง อีกหลายกระบวนการ ในระหว่างกระบวนการจะมีการตรวจสอบค่าความโก่งงอที่เกิดขึ้นจากการผลิต สุดท้ายแท่งสไลเดอร์จะถูกนำไปสร้างผิวบิน หรือ เอบีเอส (ABS; Air Bearing Surface) ที่พื้นผิวด้านหน้า และทำการเคลือบด้วย ดีแอลซี (DLC; Diamond Liked Coating) เพื่อป้องกันการขัดสี ทำการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก สุดท้ายจะถูกตัดเจียรระโนออกเป็นสไลเดอร์เดี่ยวๆ ต่อไป [7, 8]

พลังงานที่ให้สู่ระบบในการขัดเจียรระโน ถูกกำหนดจากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการ ได้แก่ ชนิดของใบตัด ชนิดของแผ่นขัดเจียรระโน ชนิดและขนาดของผงขัด สารหล่อลื่น เวลาในการขัด ความเร็วเชิงมุมการหมุนของล้อตัด แผ่นขัด และชิ้นงาน ที่ส่งผลกระทบต่ออัตรา

การหลุดออกของเนื้อวัสดุ (Removal rate) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมบัติของพื้นผิว ได้แก่ ความหยาบของพื้นผิว (Roughness) และความเค้นตกค้าง (Residual stress) ที่เกิดขึ้น [5, 6, 9]



ภาพที่ 2.2 กระบวนการขัดเจียรระโนสไลเดอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์



ภาพที่ 2.3 การระบุตำแหน่งพื้นผิวด้านหน้าและพื้นผิวด้านหลังของหัวอ่าน-เขียน

2.4 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดสำหรับวัสดุยืดหยุ่น

จากกฎของฮุก (Hooke's law) ความเค้นยืดหยุ่น (Elastic stress) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดยืดหยุ่น (Elastic strain) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) หรือ ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) [10]

$$\text{ความเค้นยืดหยุ่น } (\sigma); \quad \sigma_x = E\varepsilon_x \quad (2.1)$$

$$\text{จากอัตราส่วนของปัวซอง } (\nu); \quad \varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x \quad (2.2)$$

$$\text{ความเครียดยืดหยุ่น } (\varepsilon); \quad \varepsilon_y = \varepsilon_z = \nu\varepsilon_x = -\frac{\nu\sigma_x}{E} \quad (2.3)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ยืดหยุ่นชนิดต่างๆ เป็นไปตาม

ตารางที่ 2. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ยืดหยุ่นชนิดต่างๆ

ค่าคงที่	ความสัมพันธ์				
	E	ν	G	K	λ
E, ν	-	-	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
K, ν	$3K(1-2\nu)$	-	$\frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$	-	$\frac{3K\nu}{1+\nu}$
G, ν	$2G(1+\nu)$	-	-	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$\frac{3G\nu}{1+\nu}$
G, K	$\frac{9KG}{3K+G}$	$\frac{3K-2G}{6K+2G}$	-	-	$\frac{3K-2G}{3}$
E, G	-	$\frac{E-2G}{2G}$	-	$\frac{EG}{3(3G-E)}$	$\frac{G(E-2G)}{3G-E}$

โดยที่ E คือ มอดูลัสของยัง (Young's modulus) หรือ มอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus)

ν คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

G คือ มอดูลัสเฉือน (Shear modulus) หรือ มอดูลัสแข็งตึง (Rigidity modulus)

K คือ มอดูลัสเชิงปริมาตร (Bulk modulus)

λ ค่าคงตัวลำดับที่หนึ่งของลาม (Lamé constant)

สามารถเขียนความสัมพันธ์ความเค้นและความเครียดในรูปแบบของเทนเซอร์แบบย่อ ดังสมการ

$$\varepsilon_{ij} = \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{ij} + \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (2.4)$$

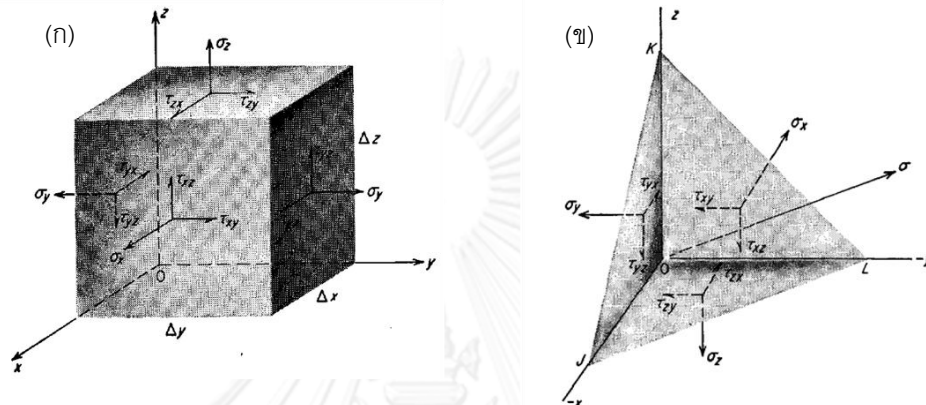
เมื่อ δ_{ij} คือ ครอนเนคเคอ เดลต้า (Kronecker delta)

ซึ่ง $\delta_{ij} = 1$ เมื่อ $i = j$ และ $\delta_{ij} = 0$ เมื่อ $i \neq j$

2.5 สภาวะความเค้น

2.5.1 สภาวะความเค้นของวัสดุที่มีสมบัติทางกลแตกต่างกันขึ้นกับทิศทาง (Anisotropic) สำหรับพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่น

2.5.1.1 องค์ประกอบของสภาวะความเค้นแบบเต็ม (Full stress state)



ภาพที่ 2.4 องค์ประกอบความเค้นแบบสามมิติ

(ก) องค์ประกอบความเค้นบนกล่องลูกบาศก์ (ข) องค์ประกอบความเค้นบนพื้นผิวใดๆ

องค์ประกอบความเค้น (Stress components) และองค์ประกอบความเครียด (Strain components) เป็นเทนเซอร์ลำดับที่สอง ส่วนองค์ประกอบค่าคงที่ยืดหยุ่นแข็งตึง (C; Elastic stiffness constant) และ องค์ประกอบค่าคงที่ยืดหยุ่นความหยุ่น (S; Elastic compliance constant) เป็นเทนเซอร์ลำดับที่สี่ ดังนั้นสามารถเขียนในรูปเมทริกซ์ ได้ดังนี้

$$\text{เมทริกซ์ ความเค้น; } \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\text{เมทริกซ์ ความเครียด; } \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

โดยสัญลักษณ์ σ แทนความเค้น τ แทนความเค้นเฉือน และ ε แทนความเครียด และตัวอักษรกำกับบรรทัดนี้ล่างตัวหน้าระบุระนาบ และตัวอักษรกำกับบรรทัดนี้ล่างตัวหลังระบุทิศทางที่ทำบนระนาบนั้น

เมทริกซ์ค่าคงที่ยืดหยุ่นแข็งตึง (Elastic stiffness constant); $\mathbf{C} =$

$$\begin{bmatrix} C_{xxxx} & C_{xxyy} & C_{xxzz} & C_{xxyz} & C_{xxzx} & C_{xxxy} & C_{xxzy} & C_{xxxz} & C_{xxyz} \\ C_{yyxx} & C_{yyyy} & C_{yyzz} & C_{yyyz} & C_{yyxz} & C_{yyxy} & C_{yyzy} & C_{yyxz} & C_{yyyx} \\ C_{zzxx} & C_{zzyy} & C_{zzzz} & C_{zzyz} & C_{zzxz} & C_{zzxy} & C_{zzzy} & C_{zzxz} & C_{zzyx} \\ C_{yzxx} & C_{zyyy} & C_{yzzz} & C_{yzyz} & C_{yzxz} & C_{yzxy} & C_{yzzz} & C_{yzzz} & C_{yzyx} \\ C_{zxxx} & C_{zxyy} & C_{zxzz} & C_{zxyz} & C_{zxxz} & C_{zxxxy} & C_{zxzy} & C_{zxxz} & C_{zxyx} \\ C_{xyxx} & C_{xyyy} & C_{xyzz} & C_{xyyz} & C_{xyxz} & C_{xyxy} & C_{xyzy} & C_{xyxz} & C_{xyyx} \\ C_{zyxx} & C_{zyyy} & C_{zyzz} & C_{zyyz} & C_{zyxz} & C_{zyxy} & C_{zyzy} & C_{zyxz} & C_{zyyx} \\ C_{xzzx} & C_{xzzy} & C_{xzzz} & C_{xzyz} & C_{xzzz} & C_{xzzxy} & C_{xzzzy} & C_{xzzz} & C_{xzyx} \\ C_{yxxx} & C_{yxxy} & C_{yxzz} & C_{yxyz} & C_{yxxz} & C_{yxxy} & C_{yxzy} & C_{yxxz} & C_{yxxy} \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์ค่าคงที่ยืดหยุ่นความหยุ่น (Elastic Compliance constant); $\mathbf{S} =$

$$\begin{bmatrix} S_{xxxx} & S_{xxyy} & S_{xxzz} & S_{xxyz} & S_{xxzx} & S_{xxxy} & S_{xxzy} & S_{xxxz} & S_{xxyz} \\ S_{yyxx} & S_{yyyy} & S_{yyzz} & S_{yyyz} & S_{yyxz} & S_{yyxy} & S_{yyzy} & S_{yyxz} & S_{yyyx} \\ S_{zzxx} & S_{zzyy} & S_{zzzz} & S_{zzyz} & S_{zzxz} & S_{zzxy} & S_{zzzy} & S_{zzxz} & S_{zzyx} \\ S_{yzxx} & S_{zyyy} & S_{yzzz} & S_{yzyz} & S_{yzxz} & S_{yzxy} & S_{yzzz} & S_{yzzz} & S_{yzyx} \\ S_{zxxx} & S_{zxyy} & S_{zxzz} & S_{zxyz} & S_{zxxz} & S_{zxxxy} & S_{zxzy} & S_{zxxz} & S_{zxyx} \\ S_{xyxx} & S_{xyyy} & S_{xyzz} & S_{xyyz} & S_{xyxz} & S_{xyxy} & S_{xyzy} & S_{xyxz} & S_{xyyx} \\ S_{zyxx} & S_{zyyy} & S_{zyzz} & S_{zyyz} & S_{zyxz} & S_{zyxy} & S_{zyzy} & S_{zyxz} & S_{zyyx} \\ S_{xzzx} & S_{xzzy} & S_{xzzz} & S_{xzyz} & S_{xzzz} & S_{xzzxy} & S_{xzzzy} & S_{xzzz} & S_{xzyx} \\ S_{yxxx} & S_{yxxy} & S_{yxzz} & S_{yxyz} & S_{yxxz} & S_{yxxy} & S_{yxzy} & S_{yxxz} & S_{yxxy} \end{bmatrix}$$

ค่าคงที่ยืดหยุ่นทั้งสองนี้ เป็นสมบัติเฉพาะตัวที่ขึ้นกับอุณหภูมิและทิศทางการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก (Crystal orientation) ของวัสดุแต่ละชนิด

2.5.1.2 กฎของฮุก (Hooke's law)

ความสัมพันธ์ช่วงยืดหยุ่นของความเค้น-ความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุก เมื่อเขียนสมการความเค้นในเทอมของความเครียด จะได้สมการ 2.5 และ เมื่อเขียนสมการความเครียดในเทอมของความเค้น จะได้สมการ 2.6

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.5)$$

โดยที่ C_{ijkl} คือ ค่าคงที่ยืดหยุ่นแข็งตึง (Elastic stiffness constant)

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.6)$$

โดย S_{ijkl} คือ ค่าคงที่ยืดหยุ่นความหยุ่น (Elastic compliance constant)

2.5.2 สภาวะความเค้นของวัสดุที่มีสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) สำหรับพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่น

2.5.2.1 องค์ประกอบของสภาวะความเค้นแบบเต็ม (Full stress state)

จากกฎของฮุก เมื่อเขียนความสัมพันธ์ในเทอมค่าคงที่ยืดหยุ่นแข็งตึงตามสมการ 2.5 ในรูปเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)+(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

และ ในเทอมค่าคงที่ยืดหยุ่นความหยุ่น ตามสมการ 2.5 ในรูปเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

2.6 หลักการแปลงพิกัด (Coordinate transformation)

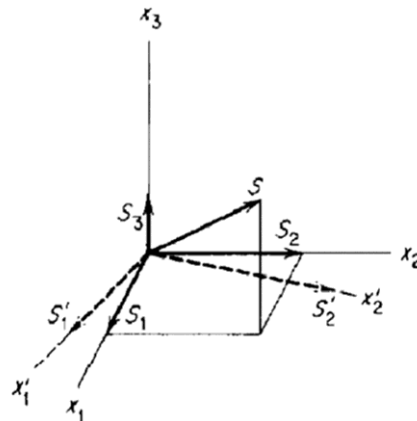
หลักการแปลงระบบพิกัดของเวกเตอร์ (1^{st} -rank order tensor) จากระบบพิกัดหนึ่งเป็นอีกระบบพิกัดหนึ่งในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) [11] เช่น

สูตรการแปลงจากพิกัด $(X_1, X_2, X_3) \Rightarrow$ พิกัด (X_1', X_2', X_3')

$$\mathbf{S}'_i = a_{ij}\mathbf{S}_j \quad (i= 1, 2, 3) \quad (2.7)$$

หรือเขียนอีกแบบได้ $\mathbf{S}_i = a_{ij}\mathbf{S}_j$ (Einstein suffix notation) (2.8)

โดย \mathbf{S}_i คือ เวกเตอร์ในแกนพิกัดก่อนการแปลง และ \mathbf{S}_j คือ เวกเตอร์ในแกนพิกัดใหม่ และ a_{ij} คือ ทิศทางโคไซน์ (Cosine direction) ระหว่างองค์ประกอบเวกเตอร์ในแกน X_1 กับแกน X_1'



ภาพที่ 2.5 การแปลงพิกัดสำหรับเวกเตอร์ S

สูตรการแปลงพิกัดสำหรับความเค้น T ซึ่งเป็น (2^{nd} rank order tensor)

$$T'_{st} = a_{sp} a_{tq} T_{pq} \quad (2.9)$$

โดย T_{pq} คือ ส่วนประกอบของความเค้นในแกนพิกัดก่อนการแปลง และ T'_{st} คือ ส่วนประกอบของความเค้นในแกนพิกัดใหม่

2.7 การหาค่ามอดูลัสและอัตราส่วนของปัวซองในวัสดุผสม

การหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนของปัวซอง สามารถหาได้จาก 1) ฐานข้อมูล
2) การทดสอบตามมาตรฐาน และ 3) การคำนวณ

2.7.1 การหาค่ามอดูลัสและอัตราส่วนของปัวซอง

การหาค่ามอดูลัสจากการทดสอบแรงดัด เป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้วัดสมบัติความแข็งแรงทางกลของวัสดุประเภทเซรามิก ในงานวิจัยที่ศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุเซรามิกนิยมใช้อยู่ 2 วิธี คือการทดสอบแรงดัดแบบรับแรงสามจุด (เช่น มาตรฐานการทดสอบ ASTM D790) และ การทดสอบแรงดัดแบบรับแรงสี่จุด (เช่น มาตรฐานการทดสอบ ASTM D6272) การศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุ พบว่ามักใช้การทดสอบแรงดัดแบบรับแรงสามจุด ซึ่งปกติจะให้ค่ามากกว่าการทดสอบแรงดัดแบบรับแรงสี่จุด การคำนวณค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (E) จากการทดสอบแบบรับแรงสามจุด กรณีที่ชิ้นงานทดสอบมีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังสมการ 2.10

$$E = \frac{FL^3}{\delta 4bd^3} \quad (2.10)$$

โดยที่ F คือ ภาระแรงที่ห้วกดกระทำ (นิวตัน) L คือ ระยะระหว่างจุดค้ำจุน (มิลลิเมตร) δ คือ ระยะโก่งมากที่สุด ณ จุดกึ่งกลาง (มิลลิเมตร) b คือ ความกว้างของชิ้นงาน (มิลลิเมตร) d คือ ความหนาชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

สามารถหาค่ามอดูลัสยืดหยุ่นในทิศทางหนึ่งของโครงสร้างผลึกที่ต้องการได้ จากการศึกษาของ Prevey และคณะ [12] ได้ใช้เทคนิคการทดสอบแรงดัดแบบสามจุดติดตั้งภายในเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ แล้วทำการให้แรงทดสอบแรงดัดไปพร้อมๆกับวิเคราะห์ด้วย

เอกซเรย์ โดยทำการติดเกจวัดความเครียดไว้ที่กึ่งกลางชิ้นงานทดสอบแรงดัด แล้วทำการทดสอบแรงดัดภายในเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ แล้วสร้างกราฟระหว่างความเค้นที่ใช้ทดสอบแรงดัดกับระยะห่างระหว่างระนาบ เพื่อคำนวณค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนของปัวซองของระนาบ (hkl) จากความสัมพันธ์ ตามสมการ 2.11 และ สมการ 2.12

$$\frac{E}{(1+\nu)_{(hkl)}} = m^* \sin^2 \psi d_{0(hkl)} \quad (2.11)$$

โดยที่ m^* คือ ความชันของกราฟระหว่างความเค้นที่ใช้ทดสอบแรงดัดกับระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl) ที่ศึกษา

$$\nu = -\frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \quad (2.12)$$

โดยที่ $\Delta d/d$ คือ ความเครียดของระยะห่างระหว่างระนาบในโครงสร้างผลึก และ $\Delta l/l$ คือ ความเครียดของชิ้นงานทดสอบแรงดัด

2.7.2 การคำนวณค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนของปัวซองในวัสดุผสม

สำหรับวัสดุผสมที่มีมากกว่า 1 เฟส ไม่มีรูพรุน สามารถคำนวณค่ามอดูลัสยืดหยุ่นทางทฤษฎีโดยเฉลี่ยจากสัดส่วนโดยปริมาตรของแต่ละเฟส ตามกฎของการผสม (Rule of mixture)

$$E = E_a V_a + E_b V_b + \dots \quad (2.13)$$

$$\nu = \nu_a V_a + \nu_b V_b + \dots \quad (2.14)$$

โดยที่ E_a คือ มอดูลัสยืดหยุ่นของเฟส a, E_b คือ มอดูลัสยืดหยุ่นของเฟส b, V_a คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟส a, V_b คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟส b

สำหรับวัสดุที่มีรูพรุน สัดส่วนของรูพรุนมีผลต่อมอดูลัสยืดหยุ่น ตามสมการ 2.15

$$E = E_0 + (1 - 1.9P + 0.9P^2) \quad (2.15)$$

โดยที่ E_0 คือ มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุกรณีไม่มีรูพรุน, P คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของรูพรุน

2.7.3 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และ อัตราส่วนของปัวซองของอะลูมินา ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ดังรายละเอียดในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และ อัตราส่วนของปัวซอง ของอะลูมินา ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

สมบัติ	วัสดุ		
	อะลูมินา	ไทเทเนียมคาร์ไบด์	อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์
มอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic Modulus, GPa)	460 ^[26]	439-444 ^[27]	390 ^[1]
อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)	0.19-0.22 ^[26]	0.17, 0.18 ^[27]	0.2 ^[1]
สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน (Coefficient Thermal expansion, ppm/K)	8.0 ^[27]	8.5 ^[27]	7.6 ^[1]
ความต้านทานการแตก (Fracture toughness, MPa*m ^{1/2})	3.0-3.5 ^[4]	3.8 ^[27]	3.8 ^[1]
ความแข็ง (Hardness, HV)	2000-2410 ^[4]	2900-3000 ^[27]	2000 ^[1]
ความหนาแน่น (Density, g/cm ³)	3.90-3.97 ^[4]	4.9 ^[27]	4.3 ^[1]
ความแข็งแรงต่อแรงดัด Bending Strength, MPa	400 ^[27]	-	880 ^[1]
ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance, mΩ*cm)	3-8 ^[27]	0.2-0.3 ^[27]	1 ^[1]
สมบัติการนำความร้อน (Thermal conduction, W/(mK)	30 ^[27]	5.64 ^[27]	24 ^[1]
ขนาด (Grain size, μm)	0.1-0.4 ^[4]	0.1-0.3	0.5 ^[1]

วัสดุเซรามิกโดยทั่วไป อัตราส่วนของปัวซอง จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.2 สำหรับงานวิจัยนี้เป็น วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ที่มีอะลูมินาเป็นวัสดุเนื้อพื้น ในการวัดปริมาณความเค้นตกค้าง จะใช้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของเฟสอะลูมินา เท่ากับ 460 GPa และเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ เท่ากับ 444 GPa ตามลำดับ และใช้ค่าอัตราส่วนของปัวซองของเฟสอะลูมินาและเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ เท่ากับ 0.19 และ 0.17 ตามลำดับ สำหรับทุกการทดลองการวัดปริมาณความเค้นตกค้าง จากการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ด้วยเทคนิค $\sin^2 \psi$ และใช้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนของปัวซองของ

วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เท่ากับ 390 GPa และ 0.2 ตามลำดับ ในการคำนวณค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความทนทานต่อการแตกหัก (Fracture toughness)

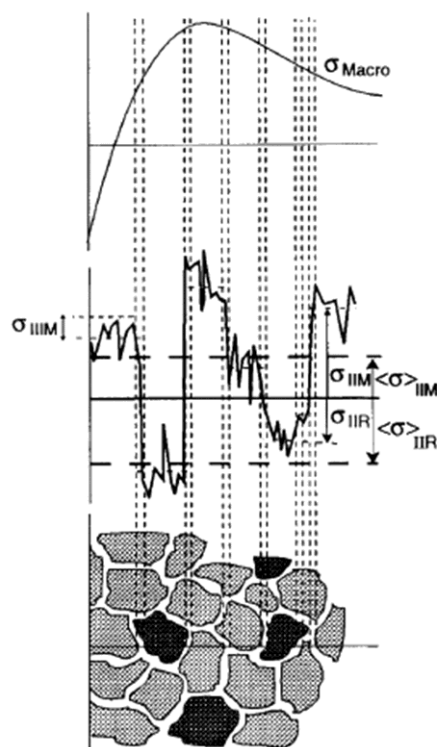
2.8 ความเค้นตกค้าง

ความเค้นตกค้าง มีความสัมพันธ์กับแรง (Forces) และ แรงคู่ควบ (Moments) ซึ่งมีอยู่ในสภาวะสมดุลภายในวัสดุ โดยปกติแล้วเกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างอย่างยืดหยุ่น (Elastic deformation) และ/หรือ การเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic deformation) ที่เกิดขึ้นกระจายอยู่อย่างไม่สม่ำเสมอภายในปริมาตรหนึ่งของเนื้อวัสดุ ภายใต้การกำหนดระดับสเกลของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ความเค้นตกค้างจะมีค่า เป็นค่าคงที่ ซึ่งจำเป็นต่อการวิเคราะห์และบอกปริมาณความเค้นตกค้าง [13-15] สามารถแบ่งการบอกปริมาณความเค้นตกค้างเป็น 3 ชนิด ตามระดับขนาดสเกล (scale) ดังนี้

(ก) ความเค้นตกค้างชนิดที่ I (Type I) เป็นความเค้นตกค้างระดับมหภาค (Macro residual stress) ซึ่งเป็นค่าคงที่โดยเฉลี่ยตลอดช่วงโครงสร้างจุลภาคระดับช่วงหลายเกรน (Grains) รวมทั้งขอบเกรน (Grain boundary) ด้วย และอยู่ในสมดุลภายในปริมาตรเนื้อวัสดุทั้งหมด เช่น กระบวนการเชื่อมโลหะสองแผ่นติดกันแล้วเกิดการบิดเบี้ยวของวัสดุทั้งก้อน หรือ กระบวนการขัดผิวด้วยการยิงอนุภาค (Shot peening)

(ข) ความเค้นตกค้างชนิดที่ II (Type II) เป็นความเค้นตกค้างในระดับจุลภาค (Micro residual stress) ซึ่งเป็นค่าคงที่โดยเฉลี่ยของโครงสร้างจุลภาคระดับผลึก (Crystal structure) หนึ่งๆ ซึ่งจะอยู่ในสมดุลช่วงผลึกหลายผลึก เช่น ความเค้นตกค้างที่เกิดจากพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและพลาสติกของวัสดุ รวมถึงพฤติกรรมการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal expansion) ที่แตกต่างกันของแต่ละโครงสร้างผลึกเดี่ยว (Single crystalline) ของวัสดุโครงสร้างแบบพหุผลึก (Polycrystalline material)

(ค) ความเค้นตกค้างชนิดที่ III (Type III) เป็นความเค้นตกค้างในระดับจุลภาค (Micro residual stress) ในระดับสเกลอยู่ภายในระดับอะตอม (Atomic scale) ได้แก่ ความผิดปกติของโครงสร้างผลึก เช่น การเกิดการแทรกตัวของอะตอมอื่นในโครงสร้างของวัสดุ (Interstitial) การเกิดดิสโลเคชัน (Dislocation) เป็นต้น



ภาพที่ 2.6 ชนิดของความเค้นตกค้างแบ่งตามระดับสเกล (Scale)

โดยที่อักษรกรรชนิตัวห้อย M แทน เฟสเนื้อพื้น และ R แทน เฟสวัสดุเสริมแรง (Reinforcement)

โดยสรุปความเค้นตกค้างสามารถเกิดได้จาก 3 สาเหตุ ได้แก่

ก) ภาระทางกลภายนอก (Applied mechanical load) เช่น กระบวนการขัดผิวด้วยการยิงอนุภาค (Shot peening)

ข) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal residual stress) เช่น การบิดเบี้ยวของโครงสร้างวัสดุหลายเฟสเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal) เนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของแต่ละเฟสไม่เท่ากัน

ค) การเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ (Phase transformation) ซึ่งปริมาตรหรือโครงสร้างเฟสที่เปลี่ยนไป ซึ่งอาจจะเกิดจากการแพร่ของอะตอมจากเฟสข้างเคียงหรือจากสิ่งแวดล้อมอื่นเข้ามาแทรกอยู่ในโครงสร้าง (Physical absorption) ก็ได้

2.9 แบบจำลองความเค้นตกค้างในวัสดุผสม

มีการศึกษาความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิและรวบรวมแบบจำลองความเค้นตกค้างในวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกในงานวิจัยของ Francisco C. Serbena [16] สำหรับวัสดุเนื้อพื้นเซรามิกที่มีเฟสเล็กๆทรงกลมกระจายอยู่ในเนื้อพื้น (Particles dispersion in ceramic matrix) มีแบบจำลอง

ดั้งเดิม คือ แบบจำลองของ Seising ภายใต้สมมติฐานที่ว่า สำหรับวัสดุผสมเนื้อพื้นเซรามิกที่มีคุณสมบัติทางกลเท่ากันทุกทิศทาง และมีอนุภาคทรงกลมกระจายอยู่ในเนื้อพื้นในสัดส่วนที่น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะมีความเค้นตกค้างที่เกิดจากอุณหภูมิ จากความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ทำให้มีอนุภาคมีความเค้นตกค้างแบบอุทกสถิต (Hydrostatic residual stress) สามารถคำนวณได้ตามสมการ 2.16 โดยที่ α อักษรกรรขณนี้ตัวห้อย p แทน อนุภาค (Particle) และ m แทน วัสดุเนื้อพื้น

$$\sigma_p = \frac{\Delta\alpha\Delta T}{\frac{(1-\nu_p)}{E_p} + \frac{(1+\nu_m)}{2E_m}} \quad (2.16)$$

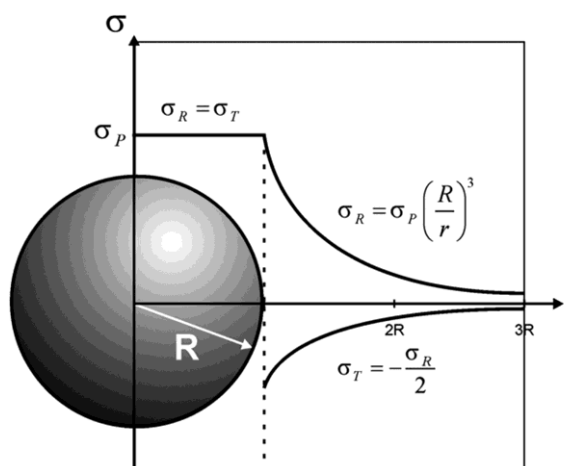
ต่อมา Eshelby ได้เสนอแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากแบบจำลองของ Seising โดยพิจารณาถึง 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient thermal expansion, α), สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction, f) และ รูปร่างผลึก (Crystal Shape) ว่ามีผลต่อความเค้นตกค้างเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) ทำให้อนุภาคมีความเค้นตกค้างแบบอุทกสถิต และ ความเค้นตกค้างในเฉลี่ยในเนื้อพื้น จะแปรผันตามกับขนาดอนุภาคและแปรผกผันกับระยะทางจากอนุภาค สามารถคำนวณได้ตามสมการ 2.17 และ 2.18 โดยที่ยังคงไม่มีส่วนคาบเกี่ยวระหว่างกันของสนามความเค้น (Stress field) ที่เกิดจากแต่ละอนุภาค ดังภาพที่ 2.7

$$\sigma_p = \frac{(\alpha_p - \alpha_m)\Delta T}{\left(\frac{1}{3K_p}\right) + \frac{1}{4(1-f)K_m} + \frac{f}{3(1-f)K_m}} \quad (2.17)$$

$$f\sigma_p + (1-f)\sigma_m = 0 \quad (2.18)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้นตกค้าง α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในกระบวนการ E คือ ค่ามอดูลัสของยัง ν คือ อัตราส่วนของปัวซอง f คือ อัตราส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค

นอกจากนี้ยังถูกนำมาประยุกต์ดัดแปลงใช้เพื่อคำนวณความเค้นตกค้างในอนุภาครูปทรงอื่นๆ ได้อีก เช่น รูปทรงเส้นใย และรูปทรงแบบแผ่น



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองความเค้นตกค้างในอนุภาคและเนื้อพื้นสำหรับวัสดุผสมเนื้อพื้น เซรามิกแก้ว

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง (Anisotropy) แบบจำลองจะพิจารณาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุรวมด้วย เช่น โครงสร้างจุลภาคแบบเฮกซะกอนอล (Hexagonal) จะมีค่าสมบัติมอดูลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนของปัวซอง และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนในแต่ละทิศทาง เช่น ในแกน a และ c ของโครงสร้างผลึกไม่เท่ากัน เป็นต้น

นอกจากนี้ Francisco C. Serbena [16] ยังได้ศึกษาและทำนายพฤติกรรมการโตของรอยแตกขนาดเล็ก (Micro cracking) ว่าจะเกิดลักษณะการโตของรอยแตก เป็นแบบระหว่างเกรน (Intergranular) หรือ จะเกิดรอยแตกแบบผ่ากลางเกรน (Transgranular) ได้ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน และความต้านทานการแตกหักระหว่างอนุภาคและเนื้อพื้น รวมทั้งอิทธิพลของความเค้นตกค้างต่อลักษณะของรอยแตกด้วย

2.10 การวัดปริมาณความเค้นตกค้าง

วิธีการวัดความเค้นตกค้างมีหลายวิธีการ การเลือกใช้จึงขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติงานที่มีความรู้ และสามารถเลือกวิธีที่ดีที่สุดภายใต้ปัจจัยและข้อจำกัดต่างๆ หลักในการพิจารณา คือ ควรเลือกวิธีและเทคนิคให้เหมาะสมกับ ชนิดวัสดุ ขนาดชิ้นงาน ลักษณะโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางกายภาพ ระดับความลึกวิเคราะห์จากพื้นผิว เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ความสามารถของปฏิบัติงานงบประมาณ ความคุ้มค่าและการใช้งาน เป็นต้น ปัจจุบันมีวิธีการวัดความเค้นตกค้างหลายเทคนิค [13, 17] โดยสรุป ดังตาราง 2.3

ตารางที่ 2.3 เทคนิคการวัดปริมาณความเค้นตกค้างแบบต่างๆ

วิธีการ	เทคนิค/เครื่องมือ	ข้อดี	ข้อจำกัด	หมายเหตุ
ทางกล	การเจาะรู (Hole drilling) การตัดเป็นชิ้น (Sectioning) การทำคอนทัวร์ (Contour) การแยก (Splitting) การเอาผิวออก (Layer removal) การทำช่องสลิต (Slitting)	ทำได้ง่ายและ รวดเร็ว	เป็นการทดสอบ แบบทำลาย สามารถเกิดความ เค้นเพิ่มขึ้นจาก กระบวนการทาง กล ความละเอียด ในการวัดต่ำ เป็นเทคนิคเดียวที่ ไม่มีผลจาก โครงสร้างจุลภาค ระดับนาโนเมตร มาเกี่ยวข้อง	ใช้เงาวัดการ คลายตัวของ ความเค้น (Stress relaxation) มีวิธีใช้เทคนิคการ ทำคอนทัวร์ ร่วมกับ ระเบียบวิธีทางไฟ ไนต์เอลิเมนต์ สามารถให้ผล ใกล้เคียงกับการ วิเคราะห์ด้วยการ เลี้ยวเบนของ นิวตรอน
	วัดความโค้งงอ (Curvature)	ทำได้ง่ายและ รวดเร็ว	ความแม่นยำถูก จำกัดโดย ความสามารถใน การงอ	การเพิ่ม/ลดชั้นผิว ทำให้เกิด การงอของวัสดุ
การเลี้ยวเบน	การเลี้ยวเบนของ เอกซเรย์ (X-ray diffraction)	ใช้หาเทนเซอร์ ของความเค้นได้ เหมาะสมกับชิ้นงาน ขนาดเล็ก	เทคนิคการวัดเพื่อ ลดความผิดพลาด และ ความไม่ แน่นอน (Uncertainty) ที่เกิดขึ้นอย่างสุ่ม และจากระบบไม่ เหมาะสมกับวัสดุที่มี เกรนขนาดเล็ก หรือผิวไม่เรียบ	ในวัสดุผสมอาจ ต้องระบุเฟสก่อน วิเคราะห์หาความ เค้นตกค้าง
	การเลี้ยวเบนของ อิเล็กตรอน (Electron diffraction)	วัดได้ที่ระดับ ความละเอียดสูง	ใช้ได้เฉพาะกับ ฟิล์มที่บางมาก น้อยกว่า 100 นา โนเมตรเท่านั้น	

ตารางที่ 2.3 เทคนิคการหาปริมาณความเค้นตกค้าง(ต่อ)

วิธีการ	เทคนิค/เครื่องมือ	ข้อดี	ข้อจำกัด	หมายเหตุ
การเลี้ยวเบน	การเลี้ยวเบนของนิวตรอน (Neutron diffraction)	สามารถวัดความเค้นที่ระดับความลึกต่างๆ ได้ สามารถวัดความเค้นตกค้างในวัสดุผสมได้	ทำได้ยาก อุปกรณ์ราคาแพง ใช้ความชำนาญในการวัด	วัดที่ระดับความลึกได้มากกว่าการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์
	การเลี้ยวเบนของซินโครตรอน (Synchrotron diffraction)	สามารถวัดความเค้นที่ระดับความลึกต่างๆ ได้ ข้อมูลที่ได้มีคุณภาพสูง	ทำได้ยาก, อุปกรณ์ราคาแพง และต้องใช้ความชำนาญในการวัด	ใช้พลังงานสูง สร้างเอกซเรย์
สมบัติทางกายภาพ	สมบัติแม่เหล็ก บาร์คเฮาเซน (Magnetic Barkhausen)	มีเทคนิคการวัดแบบ Magnetic Barkhausen Noise (MBN) และอื่นๆ	วัสดุต้องมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก เฟอร์โร Ferromagnetic เท่านั้น จำเป็นต้องแยกสัญญาณระหว่างสัญญาณจากโครงสร้างและสัญญาณจากโครงสร้างภายใต้ความเค้น	การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของโครงสร้างมีผลต่อค่าทางแม่เหล็ก
คลื่นเหนือเสียง	คลื่นเหนือเสียง (Ultrasonic)	ทำได้ง่ายและรวดเร็ว	ยังไม่เป็นมาตรฐาน ไม่เหมาะกับชิ้นงานบางระดับไมครอน	
ฟลูออเรสเซนซ์/รามาน	ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) /รามาน (Raman)	ความละเอียดสูง สามารถวัดความเค้นตกค้างในวัสดุผสมได้	เหมาะกับวัสดุบางชนิดเท่านั้น	เป็นวิธีการที่ขึ้นกับสมบัติของวัสดุ

2.11 การวัดปริมาณความเค้นตกค้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ (X-ray diffraction)

หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ เป็นการวิเคราะห์ เนื่องจากวัสดุที่มีความเค้นตกค้าง สามารถหาปริมาณความเค้นตกค้างจากรูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ได้ การหาปริมาณความเค้นตกค้างระดับมหภาค (σ) ทำได้โดยการวัดความเครียดแบบสม่ำเสมอ (Uniform strain) จากการเปลี่ยนตำแหน่งยอดของความเข้ม (Peak position) หรือตำแหน่ง 2θ (2θ shifted) จากค่ามาตรฐานของฐานข้อมูล ส่วนการหาปริมาณความเค้นตกค้างระดับจุลภาค (σ_{II} , σ_{III}) ทำได้โดยการวัดความเครียดแบบไม่สม่ำเสมอ (Non-Uniform Strain) จากการเปลี่ยนช่วงความกว้าง (Peak Broadening) ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของยอดความเข้ม (Full Width at Half Max, FWHM) [11] ภายใต้ขอบเขตการศึกษาวิจัยนี้ จะทำการศึกษาความเค้นตกค้างในระดับมหภาค (σ) เท่านั้น จึงได้เลือกใช้เทคนิคไซน์สแควร์ฟไซน์ ($\sin^2 \psi$) ซึ่งใช้หลักการอนุมานความเครียดจากการเปลี่ยนตำแหน่งยอดของความเข้ม ดังที่กล่าวมาข้างต้น

กรณีการวิเคราะห์ความเค้นตกค้างบนวัสดุแบบโครงสร้างพหุผลึก ข้อมูลที่ได้จากการรูปแบบเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) เป็นข้อมูลของการวัดระยะระหว่างระนาบจากหลายโครงสร้างผลึก ดังภาพ 2.8 [11] ดังนั้นจึงเป็นการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความเค้นตกค้างระดับมหภาคจากการวัดความเครียดจุลภาค (Micro-strain) กล่าวคือ ทำการวัดระยะระหว่างระนาบที่เปลี่ยนแปลงไป ความเครียดระดับจุลภาคที่เกิดขึ้นในระดับโครงสร้างของระนาบผลึก ตามสมการ 2.19 [11, 15, 18]

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = -\cot\theta_0 (\theta_{\phi\psi} - \theta_0) \quad (2.19)$$

โดย d คือ ระยะระหว่างระนาบในโครงสร้างผลึก (lattice spacing), $d_{\phi\psi}$ คือ ระยะระหว่างระนาบในโครงสร้างผลึกในสภาวะภายใต้ความเค้น d_0 คือ ระยะระหว่างระนาบในโครงสร้างผลึกในสภาวะเริ่มแรกที่ปราศจากความเค้น อักษรดรรชนีตัวห้อย $\phi\psi$ บอกทิศทางการหมุนของชิ้นงาน ในระบบพิกัดชิ้นงาน ตามระบบมุมของอุปกรณ์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (Diffractometer) ดังรายละเอียดใน หัวข้อ 2.11.1

จากกฎของแบรกก์ (Bragg's law) ซึ่งสามารถบอกความสัมพันธ์ของ ระยะระหว่างระนาบของโครงสร้างผลึก (Lattice spacing, d) กับ มุมที่เอกซเรย์เลี้ยวเบนจากระนาบใดๆ นั้นของโครงสร้างวัสดุแบบโครงสร้างพหุผลึก

กฎของแบรกก์

$$2d_{\phi\psi} * \sin\theta_{\phi\psi} = n\lambda \quad (2.20)$$

จากสมการความสัมพันธ์ในช่วงยืดหยุ่นระหว่างความเค้น-ความเครียด ตามกฎของฮุก และหลักการแปลงพิกัดสำหรับเวกเตอร์ ในหัวข้อ 2.6 โดยการแปลงข้อมูลการวิเคราะห์ จากรูปแบบพิกัดเครื่องมือเป็นระบบพิกัดบนชิ้นงาน จะสามารถบอกความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานได้

การติดตั้งชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์ดังแสดง ในภาพ 2.7 สำหรับการวัดสถานะความเค้นแบบมหภาคที่มีความสม่ำเสมอ (Homogeneous macroscopic stress state) ภายในปริมาตรที่มี

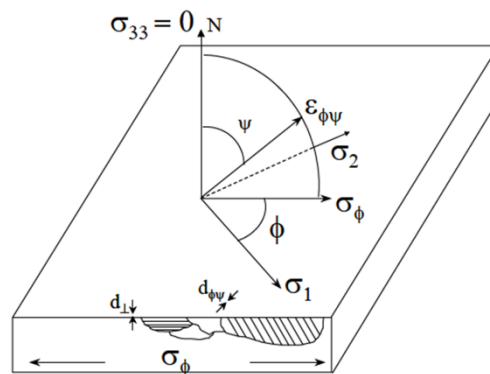
สมบัติยืดหยุ่นแบบเท่ากันทุกทิศทาง (Elastic isotropic volume) จะมีความสัมพันธ์ของความเครียดของระยะระหว่างระนาบที่วัดได้ในทิศทาง ψ ต่างๆ ของหลายโครงสร้างผลึก ($\epsilon_{\phi\psi}$) กับความเครียดในทิศทางงาน (σ_{ij}) เป็นไปตามสมการเส้นตรงตามกฎของฮุก ดังนี้

$$\begin{aligned}\epsilon_{\phi\psi} = & \frac{1}{2}s_2[\sigma_{11}\cos^2\phi + \sigma_{12}\sin 2\phi + \sigma_{22}\sin^2\phi]\sin^2\psi\cos^2\psi \\ & + \frac{1}{2}s_2\sigma_{33}\cos^2\psi + s_1[\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}] \\ & + \frac{1}{2}s_2[\sigma_{13}\cos\phi + \sigma_{23}\sin\phi]\sin 2\psi\end{aligned}\quad (2.21)$$

โดย s_1, s_2 เป็นค่าคงที่ยืดหยุ่น ตาม การกำหนดสัญลักษณ์ของโวกท์ (Voigt's notation) ซึ่งมีค่าเท่ากับ [15]

$$s_1 = -\frac{\nu}{E} \quad \text{และ} \quad \frac{1}{2}s_2 = \frac{\nu+1}{E}$$

ซึ่งได้พิจารณาสมบัติความยืดหยุ่นแบบขึ้นกับทิศทาง (Anisotropic) ของผลึกเดี่ยวและเงื่อนไข การหักล้างและการเสริมกัน ของแรงและแรงคู่ควบของวัสดุโครงสร้างแบบพหุผลึก ในหลายกรณีที เมื่อวัสดุมีสมบัติทางกลที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทางน้อยกว่า 15 เเปอร์เซ็นต์ การใช้ค่าคงที่ยืดหยุ่นแบบมหภาค (s_1, s_2) สามารถใช้ได้โดยปราศจากความผิดพลาด [15]



ภาพที่ 2.8 หลักการวัดความเค้นตกค้าง (σ_0) และ ที่พิกัด $\phi\psi$ ของชิ้นงาน

การวัดเทนเซอร์ความเค้นตกค้างแบบเต็ม (Full stress tensor) เช่น ตัวอย่างสถานะความเค้นแบบสองแกน (Biaxial stress) ในเมทริกซ์ M1.1 และ M1.2 และ สถานะความเค้นแบบสามแกน ในเมทริกซ์ M1.3 และ M1.4 ที่มีองค์ประกอบความเค้น σ_{ij} (โดยที่ $i=1,2,3$ และ $j=1,2,3$ คือระนาบและทิศทางในพิกัดของชิ้นงาน ตามลำดับ) ต้องทำการวัดความเครียดอย่างน้อย 6 ค่าที่มุม ψ ต่างๆ แล้วนำค่ามาคำนวณตามสมการ 2.21 เพื่อแก้สมการหาค่าองค์ประกอบความเครียด

ตัวอย่าง เทนเซอร์ความเค้นตกค้างแบบเต็ม สำหรับความเค้นแบบสองแกน (Biaxial stress) เช่น ความเค้นบริเวณผิวของวัสดุทดสอบ (ไม่มีแรงกระทำในทิศแนวแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว $\sigma_{33} = 0$)

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ หรือ } \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad [M1.1] \text{ หรือ } [M1.2]$$

ตัวอย่าง เทนเซอร์ความเค้นตกค้างแบบเต็ม สำหรับความเค้นแบบสามแกน (Triaxial stress) เช่น ความเค้นในเนื้อวัสดุ (มีแรงกระทำในทิศแนวแกนที่ตั้งฉากกับพื้นผิว $\sigma_{33} \neq 0$)

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix} \text{ หรือ } \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad [M1.3] \text{ หรือ } [M1.4]$$

สำหรับการคำนวณความเค้นหลัก (Principle stress, σ_ϕ) ในทิศทางที่สนใจจะสามารถหาค่าได้ โดยใช้การแปลงพิกัด เพื่อความน่าเชื่อถือตามหลักสถิติ โดยปกติจะทำการวัดค่าความเครียดที่การหมุนชิ้นงานเป็นมุม ψ ต่างๆ อย่างน้อย 6 มุม เพื่อเป็นการหาค่าเฉลี่ย

ความเค้นหลักสำหรับสภาวะความเค้นแบบสองแกน ในเมทริกซ์ M1.1 คำนวณจาก

$$\sigma_\phi = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi \quad (2.22)$$

ความเค้นหลักสำหรับสภาวะความเค้นแบบสองแกน ในเมทริกซ์ M1.2 คำนวณจาก

$$\sigma_\phi = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin^2 \phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi \quad (2.23)$$

การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ โดยเทคนิค $\sin^2 \psi$ สำหรับสภาวะความเค้นแบบสองแกน สมการ 2.21 จะถูกคำนวณในรูปของความเค้นตกค้างหลักตามสมการ 2.22 และ 2.23 โดยเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการปรับสมการเส้นตรงด้วยกำลังสองน้อยสุด (Least square fit) จากกราฟ $\sin^2 \psi$

เมื่อปรับสมการเส้นตรงจากกราฟ $\sin^2 \psi$ กับ ความเครียดจะได้สมการ 2.24 และสามารถคำนวณความเค้นตกค้างจาก ค่าความชันของกราฟ $\sin^2 \psi$

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{\nu+1}{E} \sigma_\phi \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} [\sigma_{11} + \sigma_{22}] \quad (2.24)$$

สามารถเลือกปรับสมการเส้นตรงของกราฟ $\sin^2 \psi$ กับความเครียด หรือ กราฟ $\sin^2 \psi$ กับ ระยะระหว่างระนาบ (d-spacing) หรือ กราฟ $\sin^2 \psi$ มุม 2θ ก็ได้ แล้วใช้สมการ 2.25 2.26 หรือ 2.27 ตามลำดับ เพื่อคำนวณค่าความเค้นตกค้าง

$$\sigma_\phi = \frac{E}{1+\nu} * \frac{\varepsilon_{\phi\psi}}{\sin^2 \psi} \quad (2.25)$$

$$\sigma_\phi = \frac{E}{(1+\nu)d_0} * \frac{\Delta d_{\phi\psi}}{\sin^2 \psi} \quad (2.26)$$

$$\sigma_\phi = \frac{E}{1+\nu} * \frac{-\cot\theta_0 \Delta\theta_{\phi\psi}}{\sin^2\psi} \text{ หรือ } \sigma_\phi = K * m \quad (2.27)$$

เมื่อ กำหนดให้ K คือ ค่าคงที่ความเค้น (Stress Constant)

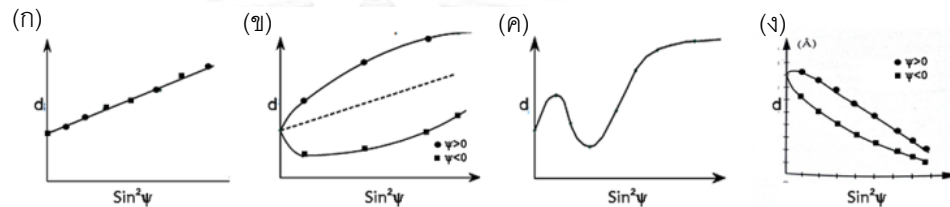
$$K = \frac{E}{1+\nu} * \frac{1}{\sin^2\psi} * \left(\frac{-\cot\theta_0}{2} \right) * \frac{\pi}{180} \quad (2.28)$$

และ m คือ ความชันของกราฟ $\sin^2\psi$ กับมุม 2θ

$$m = \frac{\Delta 2\theta_{\phi\psi}}{\sin^2\psi} \quad (2.29)$$

สำหรับการวัดความเค้นตกค้างแบบ 2 มิติ เช่น บนระนาบของพื้นผิว ($\sigma_{33} = 0$) จะกำหนด มุม ϕ ของการหมุนชิ้นงานไว้คงที่ [11]

รูปแบบลักษณะของกราฟ $\sin^2\psi$ สามารถบอกสภาวะความเค้นที่เกิดขึ้นได้ ดังนี้



ภาพที่ 2.9 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ $\sin^2\psi$ กับระยะระหว่างระนาบ (d) ที่เป็นไปได้

ก) เส้นกราฟมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

แสดงพฤติกรรมที่ความเค้นเฉือน ϵ_{13} และ $\epsilon_{23} = 0$ หรือ มีองค์ประกอบความเค้นดั่งแสดงในเมทริกซ์ [M1.1]

ข) เส้นกราฟแยกออกแบบความสัมพันธ์แปรตามกัน

แสดงพฤติกรรมที่ความเค้นเฉือน ϵ_{13} และ $\epsilon_{23} \neq 0$ หรือ มีองค์ประกอบความเค้นดั่งแสดงในเมทริกซ์ [M1.2]

ค) เส้นกราฟโค้งขึ้น-ลงเป็นรูปคลื่น

แสดงพฤติกรรมสภาวะความเค้นและความเครียดที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Inhomogeneous) ในเนื้อวัสดุเนื่องจากวัสดุมีการชอบเรียงตัวในบางทิศทาง (Preferred-orientation) หรือ มีสภาพพื้นผิวขรุขระมาก

ง) เส้นกราฟแยกออกแบบความสัมพันธ์แปรตามกัน

แสดงพฤติกรรมสภาวะความเค้นแบบสามแกน

การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ โดยเทคนิค $\sin^2\psi$ สำหรับสภาวะความเค้นแบบสามแกน ($\sigma_{33} \neq 0$) สามารถคำนวณความเค้นตกค้าง σ_{11} , σ_{12} , σ_{22} และ σ_{33} จากการปรับสมการเส้นตรงจากกราฟ a_1 กับ $\sin^2\psi$ ดังสมการ 2.30 ซึ่งในการทดสอบจะหมุนชิ้นงานในระนาบของมุม ϕ ที่มุม $\phi = 0$, 45 และ 90 องศา ส่วนความเค้นเฉือนตกค้าง σ_{13} , σ_{23} หาจาก

ความชันและจุดตัดแกนของ กราฟ a_2 กับ $\sin |2\psi|$ ดังสมการ 2.31 ที่การทดสอบจะหมุนชิ้นงานในระนาบของมุม ϕ ที่มุม $\phi = 0$ และ 90 องศา [11]

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2} [\varepsilon_{\phi\psi^-} + \varepsilon_{\phi\psi^+}] = \frac{d_{\phi\psi^-} + d_{\phi\psi^+}}{2d_0} - 1 \\ &= \{\varepsilon_{11} \cos^2 \phi + \varepsilon_{12} \sin 2\phi + \varepsilon_{22} \sin^2 \phi - \varepsilon_{33}\} \sin^2 \psi + \varepsilon_{33} \\ &= \frac{1+\nu}{E} \{\sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi - \sigma_{33}\} \sin^2 \psi \\ &\quad + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{2} [\varepsilon_{\phi\psi^-} - \varepsilon_{\phi\psi^+}] = \frac{d_{\phi\psi^-} - d_{\phi\psi^+}}{2d_0} \\ &= \{\varepsilon_{11} \cos \phi + \varepsilon_{23} \sin \phi\} \sin |2\psi| \\ &= \frac{1+\nu}{E} \{\sigma_{13} \cos \phi + \sigma_{23} \sin \phi\} \sin |2\psi| \end{aligned} \quad (2.31)$$

โดยที่ $\psi^- = (-1)\psi^+$ และ $2\psi^+ - \sin 2\psi^- = 2\sin |2\psi|$

2.11.1 ระบบมุมของอุปกรณ์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ สำหรับการวิเคราะห์ความเค้นตกค้าง [18]

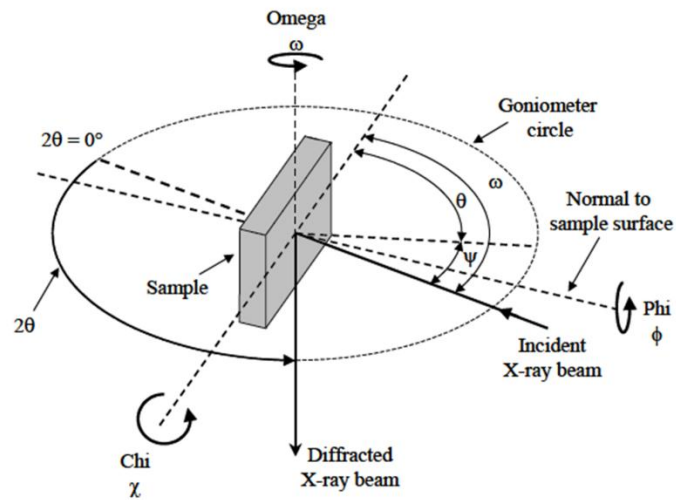
(ก) มุม 2 ธีตา (2θ) คือ มุมแบรกก์ เป็นมุมระหว่างลำรังสีเอ็กซ์ในแนวตกกระทบ (incident/transmitted beam) กับลำเอ็กซ์เรย์เลี้ยวเบน (diffracted beam)

(ข) มุมโอเมกา (ω) คือ มุมระหว่างลำเอ็กซ์เรย์ในแนวตกกระทบกับผิวชิ้นงาน อยู่ในระนาบเดียวกับมุม 2θ

(ค) มุมไฟ (Phi, ϕ) คือ มุมของการหมุนชิ้นงานไปในทิศทางรอบแกนที่ตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน

(ง) มุมไค (Chi, χ) คือ มุมที่หมุนไปในทิศทางรอบแกนที่ตั้งฉากกับระนาบของมุม ω และ 2θ

(จ) มุมไซ (Psi, ψ) คือ มุมที่หมุนชิ้นงาน ตามวิธี $\sin^2 \psi$ ที่มุม $\psi=0$ คือตำแหน่งที่มุม ω จะเป็นครึ่งหนึ่งของ 2θ

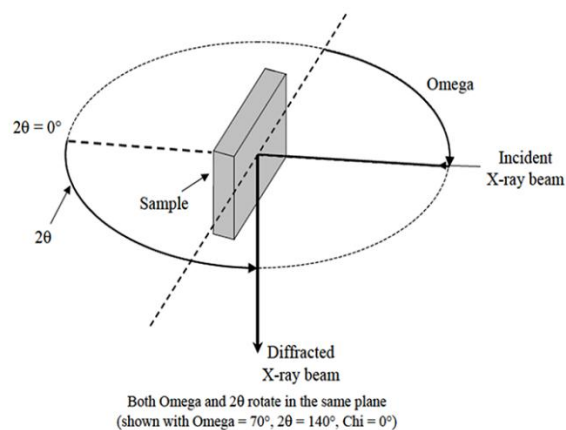


ภาพที่ 2.10 ระบบมุมของอุปกรณ์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (Diffractometer)

2.11.2 เทคนิคการหมุนชิ้นงานตามระบบแกนดิฟแฟรคโตมิเตอร์แบบนอน (Horizontal diffractometer) [18]

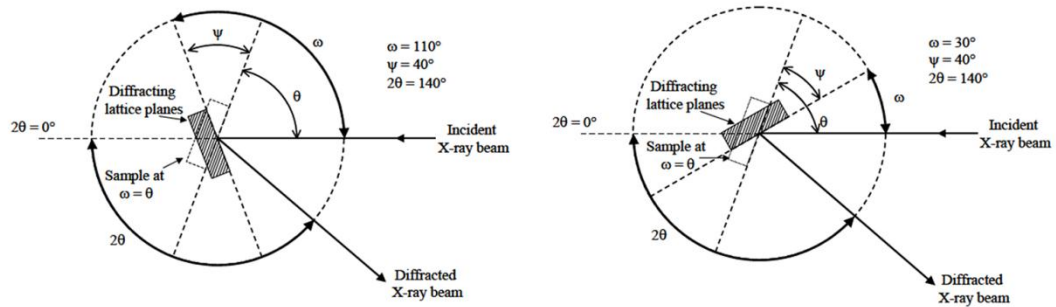
2.11.2.1 การหมุนชิ้นงานแบบวิธีโอเมกา (ω -Method)

ชิ้นงานจะหมุนเป็นมุม ψ ในระนาบของมุม ψ , มุม ω และ 2θ จะอยู่ในระนาบเดียวกัน มุม ω มีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของมุม 2θ ดังรูป 2.10 สำหรับทิศทางการหมุนชิ้นงานเป็นมุม ψ ในทิศทาง $-\psi$ หรือ $+\psi$ กำหนดไว้ดังรูป 2.12



ภาพที่ 2.11 วิธีโอเมกา (ω -Method) สำหรับระบบแกนดิฟแฟรคโตมิเตอร์แบบนอน

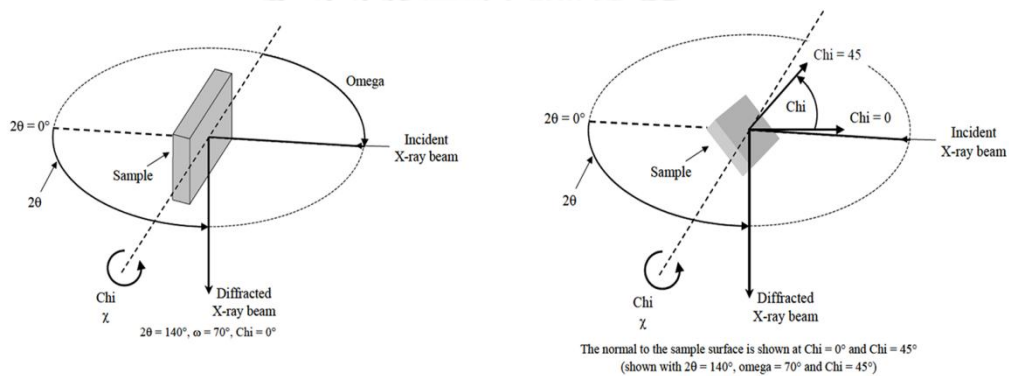
(หมุนชิ้นงานที่ปกติ $\omega=70^\circ$, $2\theta= 140$, $\chi = 0$)



ภาพที่ 2.12 ทิศทางการหมุนขึ้นงานเป็นมุม ψ ในทิศทาง $-\psi$ หรือ $+\psi$ สำหรับวิธีโอเมกา

2.11.2.2 การหมุนขึ้นงานแบบวิธีไค (χ -Method)

ขึ้นงานจะหมุนเป็นมุม ψ ในระนาบของมุม χ ซึ่งตั้งฉากกับระนาบของมุม ω และ 2θ
 ดังรูป 2.13



ภาพที่ 2.13 วิธีไค (χ -Method) สำหรับระบบแกนดิฟแฟรกโตมิเตอร์แบบนอน

(ก) หมุนขึ้นงานที่พิกัด $\omega=70^\circ, 2\theta= 140^\circ, \chi = 0^\circ$

(ข) หมุนขึ้นงานที่พิกัด $\omega=70^\circ, 2\theta= 140^\circ, \chi = 45^\circ$

2.11.2.3 ความลึกการวิเคราะห์ (Depth of analysis)

เมื่อเอกซเรย์เคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อวัสดุจะถูกดูดกลืนไปจนหมดในระยะทางสั้นๆภายใต้พื้นผิว ซึ่งระยะทางนั้นเองที่ถือเป็นความลึกวิเคราะห์ของการวัดความเค้นตึงด้วยเทคนิคเอกเรย์ดิฟแฟรกชัน [11, 18] ความลึกวิเคราะห์ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ความเข้มเอกซเรย์ (Intensity) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเอกซเรย์ของวัสดุแต่ละชนิด (Absorption coefficient, μ) และ ทิศทางของเอกซเรย์ที่ทำมุมกับชั้นงานทดสอบ พบว่า ความเข้มของเอกซเรย์จะค่อยๆ ลดลง เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential) กับระยะทางที่ลึกลงไปใต้พื้นผิว เรียก ระยะทางหรือความหนา (x) นี้ว่าเป็น ระดับความลึกวิเคราะห์ (Penetration depth) สามารถประมาณค่าจากสมการ 2.32 [18]

$$x = \frac{\ln\left[\frac{1}{1-G_x}\right]}{\mu\left[\frac{1}{\sin(\theta+\psi)} + \frac{1}{\sin(\theta-\psi)}\right]} \quad (2.32)$$

โดยค่า G_x คือ อัตราส่วนของผลรวมค่าความเข้มจากพื้นผิวถึงระดับความลึกวิเคราะห์ (x) ต่อผลรวมค่าความเข้มจากผิวถึงระยะอนันต์ ตามสมการ 2.33

$$G_x = \frac{\int_{x=0}^{x=x} dI_D}{\int_{x=0}^{x=\infty} dI_D} = [1 - e^{-\mu x \left(\frac{1}{\sin\gamma} + \frac{1}{\sin\beta}\right)}] \quad (2.33)$$

G_x เป็นค่าที่ขึ้นกับชนิดของดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ สำหรับดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ชนิดโพกัสครึ่งเสี้ยว (Parafocusing) ค่า $\gamma=\beta=0$ สำหรับกล้องแบบสะท้อนกลับหลัง (Back-reflection) $\gamma=90$ กำหนดให้ $K = \ln\left[\frac{1}{1-G_x}\right]$ ดังนั้น ค่า G_x และ K_x ได้กำหนดไว้ ดังตาราง 2.4

ตารางที่ 2. 4 ค่า K_x และ G_x สำหรับการคำนวณ ระยะความลึกวิเคราะห์

G_x	0.5	0.75	0.90	0.95	0.99	0.999
K_x	0.69	1.39	2.30	3.00	4.61	6.91

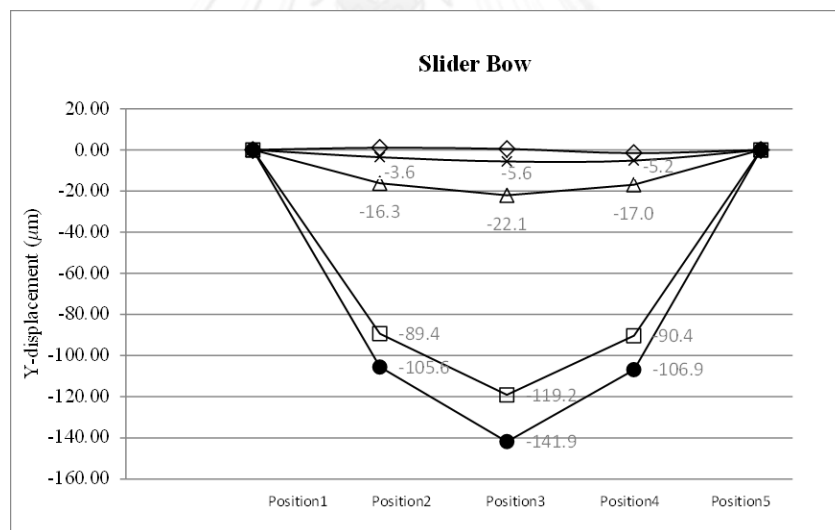
2.12 การวัดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

2.12.1 การวัดความโก่งงอของสไลเดอร์

วัดความโก่งงอของสไลเดอร์ จากการวัดการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดบนแกน Y (Y-displacement) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงและเซนเซอร์แสง ดังภาพที่ 2.14 เพื่อตรวจจับตำแหน่งที่ต้องการวัดจำนวน 5 ตำแหน่งบนสไลเดอร์ เพื่อนำมาสร้างกราฟระหว่างระยะที่เปลี่ยนแปลงบนตำแหน่งของแกน Y กับ ตำแหน่งของแกน X ดังภาพ 2.15



ภาพที่ 2.14 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงติดตั้งเซนเซอร์แสง

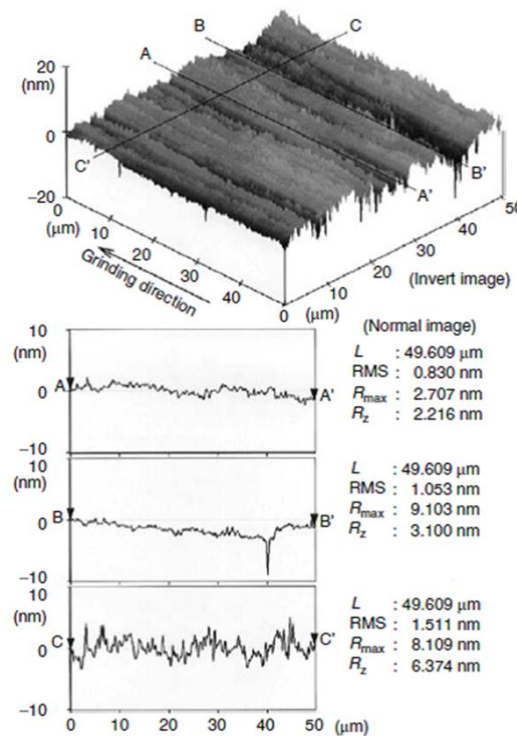


ภาพที่ 2.15 ตัวอย่างข้อมูลการวัดความโค้งงอของสไลเดอร์

2.12.2 การวัดความหยาบของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscopy หรือ AFM)

กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมประกอบด้วยคาน ที่บริเวณปลายของคานมีหัวโพรบ (Probe) ปลายแหลมในระดับนาโนเมตรยื่นลงมาสัมผัสกับพื้นผิว เมื่อลากสแกนผ่านพื้นผิวที่ต้องการตรวจสอบ แรงที่หัวโพรบผลักกับแรงของอะตอมในชิ้นงานทำให้เกิดการงอของคานตามกฎของฮุก การงอนี้จะถูกตรวจวัด ได้หลายวิธี เช่น การยิงด้วยแสงเลเซอร์แล้วสะท้อนกลับเข้าไปยังโฟโตไดโอด (Photodiode) หรือ การเลือกใช้วัสดุของคานที่มีสมบัติต้านทานเพียโซ (Piezoresistivity) ข้อมูลจะถูกแปลง

เป็นสัญญาณไฟฟ้า และสร้างภาพแสดงระยะแกน Z ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวชิ้นงานต่อพื้นที่ผิวระนาบในแนวแกน x และ y แสดงภาพโทโพกราฟี (Topography) ของพื้นผิวออกมา ดังภาพที่ 2.16 และสร้างกราฟระหว่างระยะแกน Z



ภาพที่ 2.16 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการวัดความหยาบของพื้นผิว

ข้อมูลค่าความหยาบของพื้นผิว เป็นการรายงานค่าด้วยพารามิเตอร์ทางสถิติ โดยค่าที่นิยมนำมารายงานผลได้แก่ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average, Ra) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของรากกำลังสอง (Root Mean Square, RMS or R_q) ค่าความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness points mean, R_z) และ ค่าความหยาบผิวความลึกสูงสุดของร่องความหยาบ (Maximum Roughness, R_{max})

2.13 อิทธิพลของความเค้นตึงต่อกลศาสตร์การแตกหัก (Fracture mechanics)

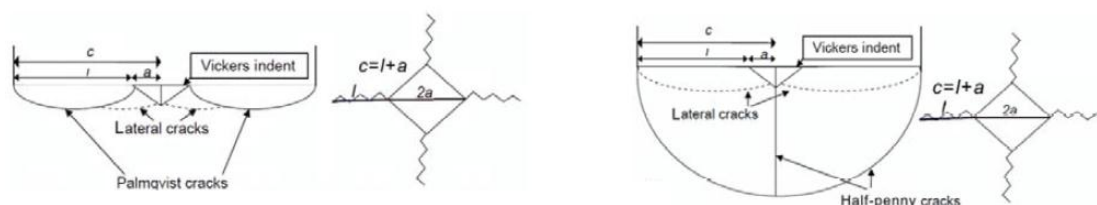
ความทนทานต่อการแตกหัก (Fracture toughness, K_{IC}) สามารถวัดได้ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบหัวกด (Micro hardness indentation) สำหรับวัสดุแข็งเปราะอย่างเช่น เซรามิก จะใช้เครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบหัวกดวิกเกอร์ (Vickers micro hardness tester) ซึ่งมีข้อดี คือ ราคาถูก ทดสอบได้ง่าย และไม่ต้องมีการทำรอยแตกเริ่มแรก (Prerequisite micro crack) จึงเตรียมชิ้นงานทดสอบได้ง่าย เนื่องจากหัวกดวิกเกอร์จะสร้างรอยแตกและรอยหัวกดขณะที่ทำการทดสอบ

รอยแตกที่ผิวจากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบหัวกดวิกเกอร์ เป็นการทดสอบกลไกการแตกในภาวะแบบเปิด (Mode I: Opening Mode) ในขณะที่หัวกด กดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบจะเป็นการให้ภาระแรงแบบดึง (Tension load) เมื่อยกหัวกดออกจะเกิดความเค้นตกค้างแบบกดเหลืออยู่บนพื้นผิว

ลักษณะของรอยแตก ขึ้นกับภาวะของกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanic mode) บริเวณที่เกิดการเสียรูปถาวร (Plastic zone) จะอยู่บริเวณรอบรอยกด ส่วนบริเวณที่มีการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic zone) จะอยู่ถัดออกมา

ความต้านทานต่อการแตกร้าว เป็นค่าที่ขึ้นกับ แรงกดของหัวกดวิกเกอร์ ความเค้นตกค้างที่ผิวของวัสดุ ระยะความยาวรอยแตก และสมบัติทางกลของวัสดุ ที่ผ่านมามีการศึกษาโดยใช้เทคนิคการทดสอบความแข็งจุลภาคด้วยหัวกดวิกเกอร์ เพื่อทดสอบเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของรอยแตก ความเค้นตกค้างและคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าความแข็ง ค่าความทนทานการแตกหัก [1, 21-25]

บริเวณที่เกิดการเสียรูปถาวร ประกอบด้วยระบบรอยแตก 2 ระบบ [19] คือ รอยแตกแนวรัศมี (Radial/Median crack) เป็นรอยแตกที่สามารถมองเห็นได้บนพื้นผิว และ รอยแตกแนวขวาง (Lateral crack) เป็นรอยแตกตามแนวขวางอยู่ลึกลงไปใต้พื้นผิว สำหรับ รอยแตกแนวรัศมีสามารถแบ่งย่อยได้อีกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะรูปร่างและอัตราส่วนระหว่างความยาวของรอยแตกต่อระยะครึ่งหนึ่งของเส้นทแยงมุมของรอยกด (Indentation) ที่เกิดจากหัวกดวิกเกอร์ คือ 1) รอยแตกปาล์มควิสต์ (Palmqvist crack) และ 2) รอยแตกรูปร่างคล้ายครึ่งเหรียญเพนนี (Half-Penny like crack) ดังภาพ 2.17

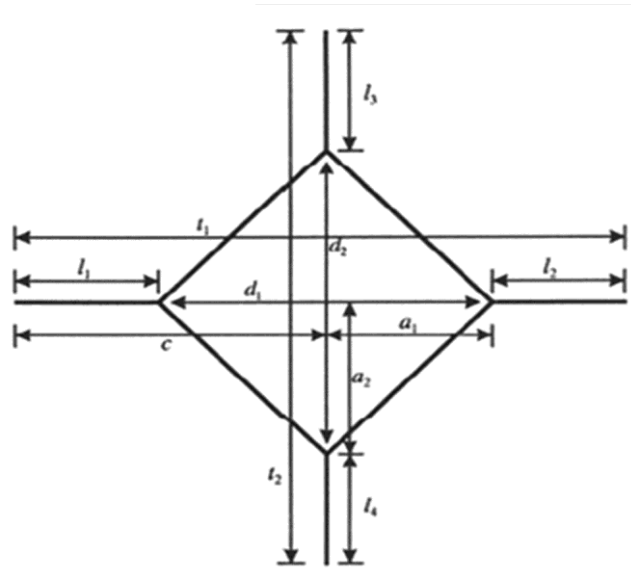


ภาพที่ 2.17 ระบบรอยแตกแนวรัศมี

(ก) รอยแตกแนวรัศมีชนิดรอยแตกปาล์มควิสต์ และรอยแตกแนวขวาง

(ข) รอยแตกแนวรัศมีชนิดรอยแตกคล้ายครึ่งเหรียญเพนนี และรอยแตกแนวขวาง

การทดสอบความแข็งจุลภาคแบบหัวกดวิกเกอร์ ใช้มาตรฐาน ASTM-C1327-03 [20]
ในการทดสอบ



ภาพที่ 2.18 การวัดขนาดเส้นทแยงมุมและรอยแตกของรอยกด

คำนวณความแข็งวิกเกอร์ (Vickers Hardness, H) จาก

$$H = 1.854 \left(\frac{F}{d_{ave}^2} \right) \quad (2.34)$$

คำนวณความทนทานต่อการแตกหัก (Fracture toughness, K_{IC})

$$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{H} \right)^2 \left(\frac{F}{c_{ave}^2} \right) \quad (2.35)$$

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 แผ่นเวเฟอร์วัสดุผสมผสมอะลูมินา-ผสมอะลูมินาไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ยังไม่ได้ทำการปลูกรงจรไฟฟ้า

3.1.2 สไลเดอร์วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเจียรไนจากกระบวนการผลิต

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง

3.2.1 เครื่องขัดเจียรไนหยาบ (Grinding) และเครื่องขัดเจียรไนละเอียด (Lapping)

3.2.2 ใบตัดเหมือน ขัดเจียรไนหยาบที่ความละเอียดผงดัดต่างๆ (Slicing wheel & Grinding wheel) แผ่นขัดเจียรไน (Lapping plate) ผงดัดเจียรไนเพชรที่ความละเอียดต่างๆ สเลอรี่ของเพชร (Diamond slurry) และ สารหล่อลื่น (Lubricant)

3.2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูงติดตั้งเซ็นเซอร์แสง

3.2.4 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชั่น (XRD) ที่ดิฟแฟรคโตมิเตอร์สามารถหมุนชิ้นงานในระนาบของมุม ψ ได้ รายละเอียดของชิ้นส่วนอุปกรณ์ ดังตารางที่ 3.1

3.2.5 เครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบหัวกดวิกเกอร์ (Vickers micro hardness tester)

3.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope)

3.3 วิธีการทดลอง

ทำการสร้างชิ้นงานสำหรับการวัดความเค้นตกค้าง (ดังรายละเอียดหัวในข้อ 3.3.1) วิธีทดลองแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก คือ การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (ดังรายละเอียดหัวในข้อ 3.3.2) การวัดความโก่งงอ (ดังรายละเอียดหัวในข้อ 3.3.3) การวัดความหยาบของพื้นผิว (ดังรายละเอียดหัวในข้อ 3.3.4) และ การวัดความยาวของรอยแตก (ดังรายละเอียดหัวในข้อ 3.3.5) สำหรับหัวข้อ 3.3.6 จะเป็นแผนภูมิสรุปของการทดลอง

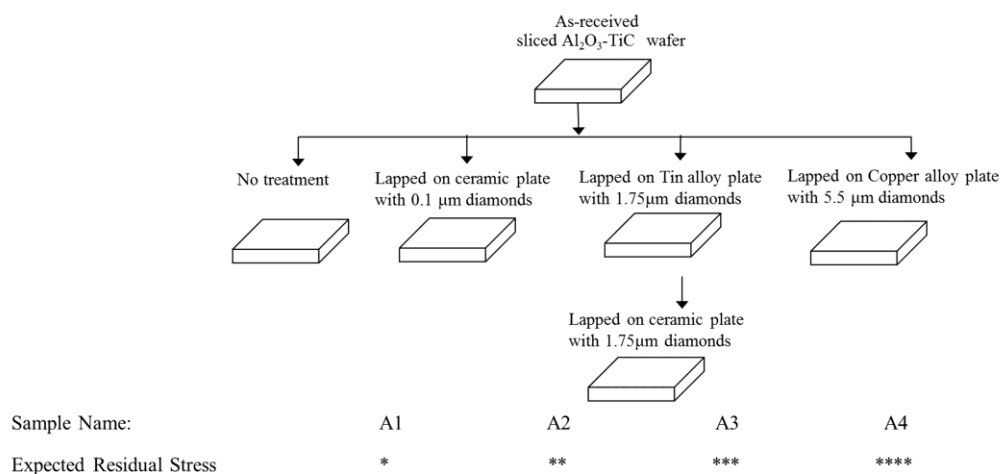
3.3.1 ชิ้นงานและการเตรียมชิ้นงาน

การทดสอบความเค้นตกค้างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชั่น สำหรับชิ้นงานสไลเดอร์ปกติซึ่งมีขนาดเล็ก พื้นที่หน้าตัดสำหรับการทดสอบ จะมีพื้นที่พอดีกับที่ลำเอกซเรย์ตกกระทบ ดังนั้น

ในตอนแรกจึงเตรียมชิ้นงานทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อทำการทดสอบในเบื้องต้นก่อน (ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1.1) อีกทั้ง เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการหาปริมาณความเค้นตกค้างบนวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการเจียรไนด้วยเงื่อนไขการตั้งค่าพารามิเตอร์แบบพิเศษ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่คาดว่าจะทำให้เกิดปริมาณความเค้นตกค้างขนาดมาก-น้อยต่างกัน ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่ใช้ยังคงอยู่ในพิสัยของกระบวนการเจียรไนปกติของกระบวนการผลิตสไลเดอร์ จากนั้น จึงทำการทดสอบกับวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในรูปแบบชิ้นงานสไลเดอร์ที่มีขนาดและเงื่อนไขพารามิเตอร์สำหรับการเจียรไนด้วยกระบวนการปกติ (ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1.2)

3.3.1.1 ชิ้นงานอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมจตุรัสผืนบาง

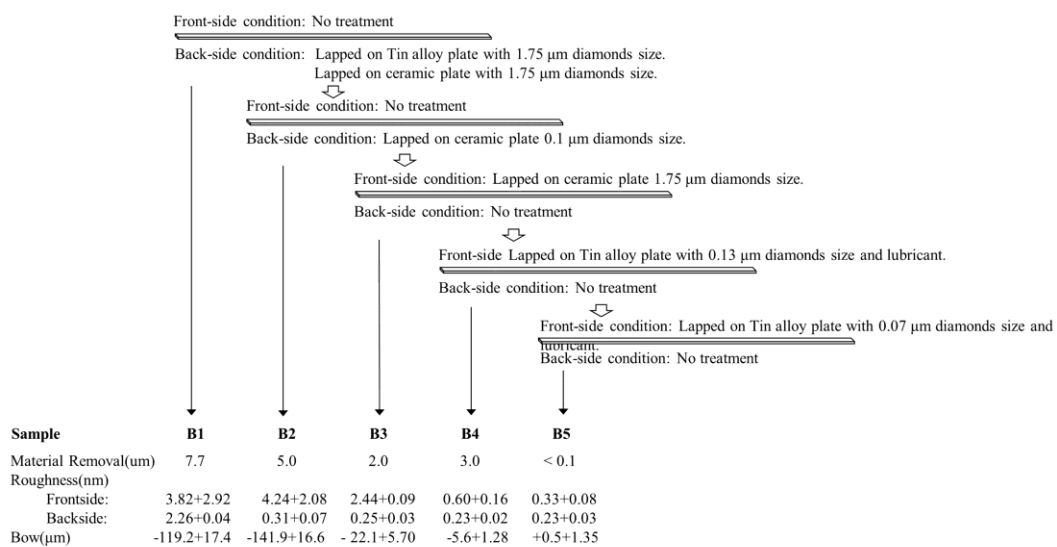
ชิ้นงานถูกตัดออกมาจากเวเฟอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการขัดเจียรไนผิวด้านหลัง (Wafer back grinding process) ให้มีความหนาเหลือที่ 0.85 มิลลิเมตร และถูกตัดออกเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 10 มิลลิเมตร x 10 มิลลิเมตร ด้วยกระบวนการตัด (Slicing) จำนวน 4 ชิ้น ได้แก่ ชิ้นงาน เอ 1 (A1) เอ 2 (A2) เอ 3 (A3) และ เอ 4 (A4) ชิ้นงานทดสอบ เอ 1 จะไม่ถูกขัดเจียรไน ส่วนชิ้นงาน เอ 2 เอ 3 และ เอ 4 จะถูกขัดด้วยเงื่อนไขพารามิเตอร์ของการเจียรไนที่ต่างกัน ด้วยขนาดผงเพชรและชนิดของแผ่นขัด ซึ่งคาดว่าจะปริมาณความเค้นตกค้างที่ใส่เข้าไปในชิ้นงาน เอ 1 ถึง เอ 4 จะมีปริมาณน้อยสุดไปจนมากที่สุด ตามลำดับ ดังรายละเอียดในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ชิ้นงานอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมจตุรัสผืนบาง

3.3.1.2 แสดงสไลเดอร์ที่ถูกผลิตขึ้นในกระบวนการปกติ กล่าวคือ เวเฟอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ผ่านกระบวนการขัดเจียรไนผิวด้านหลังให้มีความหนาเหลือที่ 0.85 มิลลิเมตร และถูกตัดออกเป็นชิ้นๆ (Sections) และถูกตัดเป็นแท่งสไลเดอร์ (Slicing) ขนาด 0.85 มิลลิเมตร (กว้าง) x 46.08 มิลลิเมตร (ยาว) x 0.18 (หนา) มิลลิเมตร แผ่นผึงกระบวนการดังภาพที่ 2.2 หลังจากนั้นจะผ่านกระบวนการขัดเจียรไนหยาบ (Grinding) ที่ผิวด้านหน้า (front side surface) หรือ ผิวเอบีเอส (Air Bearing Surface, ABS) ชิ้นงานสไลเดอร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบความเค้น

ตกค้าง 5 ชั้น ถูกเลือกออกมาหลังจากผ่านกระบวนการเจียรไนละเอียด ปี 1 (B1) ถึง ปี 5 (B5) ตามลำดับ เพื่อศึกษาปริมาณความเค้นตกค้างและการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสไลเดอร์ กล่าวคือ การโก่งงอ ความหยาบของพื้นผิว และ ระยะรอยแตกที่เกิดจากการสร้างรอยแตกด้วยหัวกดวิกเกอร์ ซึ่งกระบวนการเจียรไนละเอียด ปี 1 ถึง ปี 5 ในแต่ละขั้นตอนจะเป็นการขัดเจียรไนความหนาพื้นผิวออกเพื่อให้ได้ขนาดและคุณภาพพื้นผิว คือ ค่าความหยาบผิว (Roughness) ให้น้อยลง กล่าวคือ การให้ผิวเรียบมากขึ้น จนได้ตามข้อกำหนด (Specification) กระบวนการ B1 และ B2 ทำการขัดเจียรไนเฉพาะผิวด้านหลัง กระบวนการ ปี 3 ปี 4 และ ปี 5 ทำการขัดเจียรไนเฉพาะพื้นผิวด้านหน้า ดังรายละเอียดในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานสไลเดอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ที่ถูกเลือกออกมาจากกระบวนการเจียรไน 5 ขั้นตอนย่อย จากปี 1 ถึง ปี 5

3.3.2 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์

3.3.2.1 ทำการวัดความเค้นตกค้างเบื้องต้นด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์บนชิ้นงานอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมจตุรัสแผ่นบาง

3.3.2.1.1 นำชิ้นงานที่ถูกเตรียมด้วยกระบวนการเจียรไนตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1.1 ไปวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบเอ

3.3.2.1.2 ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) บนชิ้นงาน เอ 1 เพื่อตรวจสอบสัดส่วนโดยปริมาตรและโครงสร้างจุลภาคของอะลูมินาและไทเทเนียมคาร์ไบด์ในวัสดุผสม

3.3.2.1.3 เลือกระนาบสำหรับการทดสอบความเค้นตกค้างสำหรับเฟสอะลูมินาและเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ หรือ ตำแหน่ง 2θ ของระนาบที่จะทำการวิเคราะห์ จากรูปแบบการ

เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Diffraction pattern) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

3.3.2.1.4 ทำการวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค $\sin^2\psi$ บนชิ้นงาน เอ 1 เอ 2 เอ 3 และ เอ 4 บนพื้นผิวด้านบนที่ถูกเจียรระไน โดยมีรายละเอียดของการใช้อุปกรณ์และการตั้งค่าพารามิเตอร์ ดังตาราง 3.1

3.3.2.1.5 ผลที่ได้จากการทดลองวัดปริมาณความเค้นตกค้างเป็นกราฟ $\sin^2\psi$ กับมุม 2θ บันทึกข้อมูลดิบของพีคกราฟ และ ค่าปริมาณความเค้นตกค้างที่วัดได้จากเครื่อง

3.3.2.1.6 ตรวจสอบผลการทดลอง โดยทำการคำนวณปริมาณความเค้นตกค้างจากข้อมูลดิบของพีคกราฟ ตามสมการ 2.27 เทียบกับ ค่าปริมาณความเค้นตกค้างที่วัดได้จากเครื่อง เพื่อให้เข้าใจที่มาของการคำนวณและตรวจสอบความถูกต้องของการวัด

3.3.2.1.7 วิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันในการวัดปริมาณความเค้นตกค้าง พิจารณาความเหมาะสมของวิธีการและเครื่องมือวัด คุณภาพของข้อมูลเวลาที่ใช้ในการวัด

3.3.2.1.8 วิเคราะห์ปริมาณความเค้นตกค้างโดยเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นบนเฟสอะลูมินาและปริมาณความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นบนเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์

3.3.2.2 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์บนสไลเดอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

3.3.2.2.1 นำชิ้นงานที่ถูกเตรียมด้วยกระบวนการเจียรระไนตามรายละเอียดในหัวข้อ 3.3.1.2 การวัดความเค้นตกค้างด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบบี และ ห้องทดสอบซี

3.3.2.2.2 ห้องทดสอบบี ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) บนชิ้นงาน บี 1 เพื่อตรวจสอบยืนยันผลสัดส่วนโดยปริมาตร และโครงสร้างจุลภาคของอะลูมินาและไทเทเนียมคาร์ไบด์ในวัสดุผสม

3.3.2.2.3 ทำการวัดความเค้นตกค้างด้วยเทคนิค $\sin^2\psi$ บนชิ้นงาน บี 1 บี 2 บี 3 บี 4 และ บี 5 บนพื้นผิวด้านหลัง (Back side surface) และพื้นผิวด้านหน้า (Front side surface) ของสไลเดอร์ ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบ บี ทั้งนี้ ชิ้นงานอีกชุดหนึ่งที่ใช้เงื่อนไขการเจียรระไนเช่นเดียวกับ ชิ้นงาน บี 1 บี 2 บี 3 บี 4 และ บี 5 ถูกนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบ ซี รายละเอียดของการใช้อุปกรณ์และการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบของห้องทดสอบบี และ ของห้องทดสอบ ซี ดังแสดงในตาราง 3.1

3.3.2.2.4 ผลที่ได้จากการทดลองวัดปริมาณความเค้นตกค้างเป็นกราฟ $\sin^2\psi$ กับมุม 2θ ข้อมูลดิบของพีคกราฟ และค่าปริมาณความเค้นตกค้างที่วัดได้จากเครื่อง

3.3.2.2.5 ตรวจสอบผลการทดลอง โดยทำการคำนวณปริมาณความเค้นตกค้าง จากข้อมูลดิบของพีคิโตกราฟ ตามสมการ 2.27 เทียบกับ ค่าปริมาณความเค้นตกค้างที่วัดได้จากเครื่อง เพื่อให้เข้าใจที่มาของการคำนวณและตรวจสอบความถูกต้องของการวัด

3.3.2.2.6 หาค่าความต่างของปริมาณความเค้นตกค้างระหว่างพื้นผิวด้านหลังและพื้นผิวด้านหน้า (Δ Residual stress) ของชิ้นงาน ปี 1 ปี 2 ปี 3 ปี 4 และ ปี 5

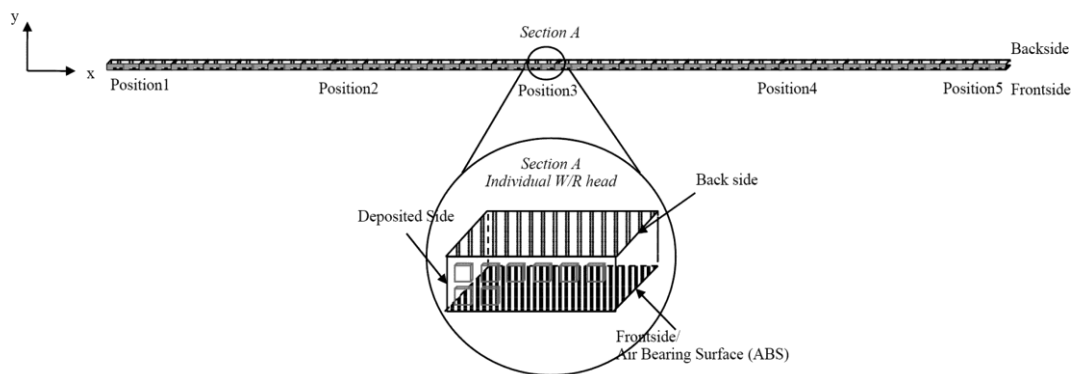


ตารางที่ 3.1 รายละเอียดเทคนิคการติดตั้งอุปกรณ์ และการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการวัด ปริมาณความเค้นตกค้างด้วยวิธี $\sin^2 \psi$

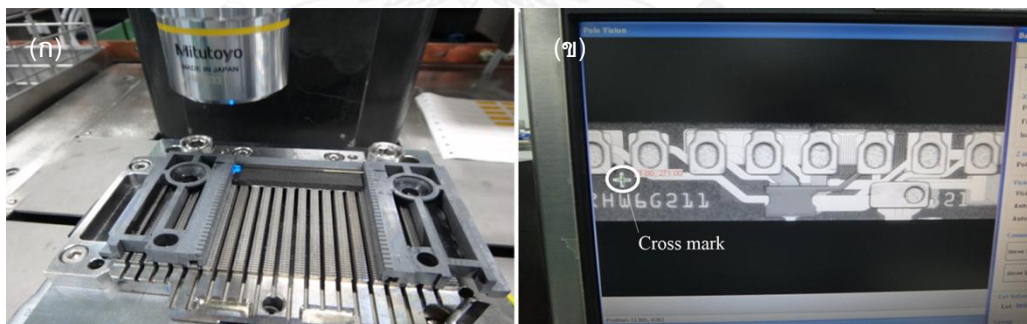
	ห้องทดสอบ A	ห้องทดสอบ B	ห้องทดสอบ C
อุปกรณ์			
หลอดเอกซเรย์	ทองแดง (Cu Source)	ทองแดง (Cu Source)	ทองแดง (Cu Source)
ความต่างศักย์ (กิโลโวลต์)	40	40	40
กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	50	40	40
กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	2000	1600	1600
ตัวรับสัญญาณและช่องสลิต (Detector and Slit)	Scintillation	Solid State Fast Detector 1 มิติ 0.6 มม.	Scintillation
พารามิเตอร์การทดสอบ			
ระนาบการเลี้ยวเบน ตำแหน่ง 2θ	TiC (4 2 2) และ Al_2O_3 (4 0 10) TiC ; 121.36 องศา Al_2O_3 ; 145.31 องศา	TiC (4 2 0) TiC ; 105.02 องศา	TiC (4 2 2) TiC 121.36 องศา
PCPDF#	TiC, 01-089-3828 Al_2O_3 , 01-071-3646		
มุม ψ (6 มุม)	0, 18.43, 26.57, 33.21, 39.23, 45.00	0, 18.43, 26.57, 33.21, 39.23, 45.00	0, 18.43, 26.57, 33.21, 39.23, 45.00
ทิศทางการทดสอบความเค้น	0 องศา เทียบกับขอบชิ้นงานสี่เหลี่ยมจัตุรัสแผ่นหนา	0 องศา ขนานตามแนวขอบของด้านที่ยาวที่สุดของสไลเดอร์	0 องศา ขนานตามแนวขอบของด้านที่ยาวที่สุดของสไลเดอร์
ชนิดเครื่องมือตามแกนการหมุนของเครื่องมือและการหมุนชิ้นงาน	แกนเครื่องมือแบบขวาง ชิ้นงานหมุนแบบ ω	แกนเครื่องมือแบบตั้ง ชิ้นงานหมุนแบบ ω	แกนเครื่องมือแบบขวาง ชิ้นงานหมุนแบบ χ หรือ ψ

3.3.3 การวัดความโค้งงอของสไลเดอร์

วัดค่าเฉลี่ยความโค้งงอของสไลเดอร์ หรือ ระยะของตำแหน่งบนแกน X เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางบวกหรือลบในทิศทางของระนาบบนแกน Y (Y-displacement) กำหนดการวัดตำแหน่งที่หนึ่ง ตำแหน่งที่สอง ตำแหน่งที่สาม ตำแหน่งที่สี่ และตำแหน่งที่ห้า ซึ่งเป็นตำแหน่งของหัวอ่าน-เขียน ตัวที่สาม ตัวที่สิบห้า ตัวที่ยี่สิบเจ็ด ตัวที่สามสิบเก้า และ ตัวที่ห้าสิบเอ็ดบนสไลเดอร์ ที่ตำแหน่ง $Y=0$ ซึ่งก็คือที่ระยะกึ่งกลางของความหนาแห่งสไลเดอร์ จะมีสัญลักษณ์เครื่องหมายบวก (cross mark) ที่ตั้งเป็นจุดจับตำแหน่งของเซนเซอร์แสง ผิวด้านบนของสไลเดอร์อยู่ทางด้านล่างของแกน X หรือ ระยะ (-Y) ผิวด้านหลังอยู่ทางด้านบนของแกน X หรือ ระยะ (+Y) ดังภาพ 3.3 และ 3.4 ทำการวัดค่าเก็บข้อมูลจากสไลเดอร์ 6-8 ชิ้นต่อกลุ่มชิ้นงาน ปี 1 ปี 2 ปี 3 ปี 4 และ ปี 5



ภาพที่ 3.3 ตำแหน่งการวัดการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดบนแกน Y (Y-displacement) บนสไลเดอร์



ภาพที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูงติดตั้งเซนเซอร์แสง และจุดสัญลักษณ์เครื่องหมายบวกกึ่งกลางสไลเดอร์ ที่ใช้ในการวัดความโค้งงอ

(ก) เซนเซอร์แสงตกกระทบลงบนตำแหน่งการวัดที่ 1 บนสไลเดอร์

(ข) เซนเซอร์แสงตกกระทบลงบนตำแหน่งเครื่องหมายบวก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางความหนาของสไลเดอร์

3.3.4 การวัดความหยาบของพื้นผิว

วัดความหยาบของพื้นผิวด้วยเครื่อง AFM เริ่มลากหัวโพรบบนพื้นผิวของหัวอ่าน-เขียนตัวที่ห้า ตัวที่สิบห้า ตัวที่ยี่สิบเจ็ด ตัวที่สี่สิบ และ ตัวที่ห้าสิบ เป็นระยะทาง 30 ไมครอนต่อหัวอ่าน-เขียนรวมเป็นระยะทาง 150 ไมครอนต่อสไลเดอร์ แล้วเก็บข้อมูล ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average, Ra) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของรากกำลังสอง (Root Mean Square, RMS or R_q) และ ค่าความหยาบผิวความลึกสูงสุดของร่องความหยาบ (Maximum Roughness, R_{max}) ทำการทดสอบทั้งพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่างของสไลเดอร์ วัดค่าเก็บข้อมูลจากสไลเดอร์ 1 ชิ้น ต่อกลุ่มชิ้นงาน ปี 1 ปี 2 ปี 3 ปี 4 และ ปี 5

3.3.5 การวัดระยะของรอยแตกที่เกิดจากการสร้างรอยแตกด้วยหัวกดวิกเกอร์

3.3.5.1 สร้างรอยแตกบนผิวชิ้นงานสไลเดอร์บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน 3 จุด ทั้งบนพื้นผิวด้านบนและบนพื้นผิวด้านล่าง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบหัวกดวิกเกอร์ ทำการวัดค่าเก็บข้อมูลจากสไลเดอร์ 1 ชิ้น ต่อกลุ่มชิ้นงาน ปี 1 ปี 2 ปี 3 ปี 4 และ ปี 5

3.3.5.2 ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM-C1327-03 โดยใช้แรงกด (F) ที่ 1KgF (HV1) ใช้เวลาพักค้าง (Dwell time) ที่ 15 วินาที

3.3.5.3 ถ่ายภาพรอยแตกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า และ 500 เท่า

3.3.5.4 วัดระยะรอยแตก (c_1, c_2, c_3, c_4) และระยะเส้นทแยงมุมของรอยกด (d_1, d_2) แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.3.5.5 คำนวณสมบัติทางกล คือ ค่าความแข็ง (Hardness) และความต้านทานการแตก (Fracture toughness) โดยแทนค่าอิลาสติกมอดูลัส (E) = 390 GPa สำหรับวัสดุผสมอะลูมิเนียม-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ในสมการ 2.34 และ 2.35

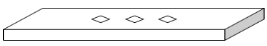
3.3.5.6 วิเคราะห์ผลการทดลองของความเค้นตกค้างที่ส่งผลต่อลักษณะของรอยแตก (Crack characterization) และความเค้นตกค้างที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล คือ ค่าความแข็ง และความต้านทานการแตกหัก

3.3.6 แผนภูมิสรุปการทดลอง

ตารางที่ 3.2 แผนภูมิการทดลองศึกษาการวัดปริมาณความเค้นตกค้างด้วยการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ ด้วยวิธี $\sin^2\psi$

การทดสอบ	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลองและการวิเคราะห์
<p>1. การทดสอบเบื้องต้น</p> <p>ชิ้นงานทดสอบวัสดุอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์แบบแผ่นบาง ได้แก่ ชิ้นงานเอ 1 เอ 2 เอ 3 และ เอ 4</p>	<p>ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบเอ</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>XRD</p> <p>ศึกษาวัสดุผสม Al_2O_3-TiC</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>E, ψ</p> <ul style="list-style-type: none"> - ผู้ผลิตเวเฟอร์ - ฐานข้อมูล - งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟส Al_2O_3 ต่อ TiC</p> <ul style="list-style-type: none"> - เปรียบเทียบผลกับข้อมูลจากผู้ผลิตแผ่นเวเฟอร์ </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>ความเค้นตกค้าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - Al_2O_3 (4 0 10) - TiC (4 2 2) </div> </div>	<p>คำนวณและวิเคราะห์</p> <ul style="list-style-type: none"> - ค่าเฉลี่ยความเค้นตกค้าง - ระยะเวลาลี้กของการทดสอบ
<p>2. การทดสอบบนสไลเดอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ได้แก่ ชิ้นงานบี 1 บี 2 บี 3 บี 4 และ บี 5</p>	<p>ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบบี และ ทดสอบซี</p> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>XRD</p> <p>ศึกษาวัสดุผสม Al_2O_3-TiC</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>E, ψ</p> <ul style="list-style-type: none"> - ผู้ผลิตเวเฟอร์ - ฐานข้อมูล - งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; width: 100%;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>สัดส่วนโดยปริมาตรของเฟส Al_2O_3 ต่อ TiC</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 45%;"> <p>ความเค้นตกค้าง</p> <ul style="list-style-type: none"> - ห้องทดสอบ B TiC (4 2 0) - ห้องทดสอบ C TiC (4 2 2) </div> </div>	<p>คำนวณและวิเคราะห์</p> <ul style="list-style-type: none"> - ค่าเฉลี่ยความเค้นตกค้าง - ระยะเวลาลี้กของการทดสอบ

ตารางที่ 3.3 แผนภูมิการทดลองวัดระยะรอยแตกที่สร้างด้วยหัวกดวิกเกอร์

การทดสอบ	ขั้นตอนการทดลอง	ผลการทดลองและการวิเคราะห์
<p>ทดสอบบนสไลเดอร์อะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ได้แก่ ชั้นงาน B1, B2,B3,B4 และ B5</p>	<p>เครื่องทดสอบความแข็งแบบหัวกดวิกเกอร์</p>  <p>สร้างรอยแตกบนผิวบริเวณกึ่งกลางสไลเดอร์</p> <ul style="list-style-type: none"> - 3 รอยที่ผิวด้านหน้า - 3 รอยที่ผิวด้านหลัง <p>SEM</p> <ul style="list-style-type: none"> - ถ่ายภาพรอยแตก - วัดขนาดความยาวของรอยแตก (c) และระยะเส้นทแยงมุมรอยแตก (d_1, d_2) 	<ul style="list-style-type: none"> - วิเคราะห์ลักษณะรอยแตก (c/a) - คำนวณ Hardness, K_{IC}

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง

4.1. การคำนวณปริมาณความเค้นตกค้างที่เกิดจากกระบวนการกดอัดด้วยความร้อนและความดันสถิตแบบเท่ากันทุกทิศทาง

สามารถประมาณปริมาณความเค้นตกค้างในเฟสทาทานิยมคาร์ไบด์ ได้ ตามแบบจำลองของ Eshelby ตามสมการ 2.17 คำนวณโดยใช้สมบัติของวัสดุ ดังแสดงในตาราง 4.1 ภายใต้สมมุติฐานว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1000 °C ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนมีค่าใกล้เคียงกับที่ 1000°C

ตารางที่ 4.1 สมบัติของวัสดุที่ใช้คำนวณปริมาณความเค้นตกค้างในเฟสทาทานิยมคาร์ไบด์จากกระบวนการกดอัดด้วยความร้อนและความดันสถิตแบบเท่ากันทุกทิศทาง

เฟส	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนเชิงเส้น, α (ppm/K)	มอดูลัสยืดหยุ่น, E (GPa)	อัตราส่วนของปัวซอง, ν	มอดูลัสเชิงปริมาตร, K (GPa)	มอดูลัสเฉือน, G (GPa)	สัดส่วนโดยปริมาตร, f
Al ₂ O ₃	ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 25-400°C มีค่าเท่ากับ 5.4-7.6 ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 25-1000°C มีค่าเท่ากับ 8.0	469	0.19	252	197	0.65
TiC	ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 25 -400°C มีค่าเท่ากับ 4.3-7.7 ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 25-1000°C มีค่าเท่ากับ 8.5	444	0.17	224	187	0.35
Al ₂ O ₃ -TiC	7.6	390	0.19			1

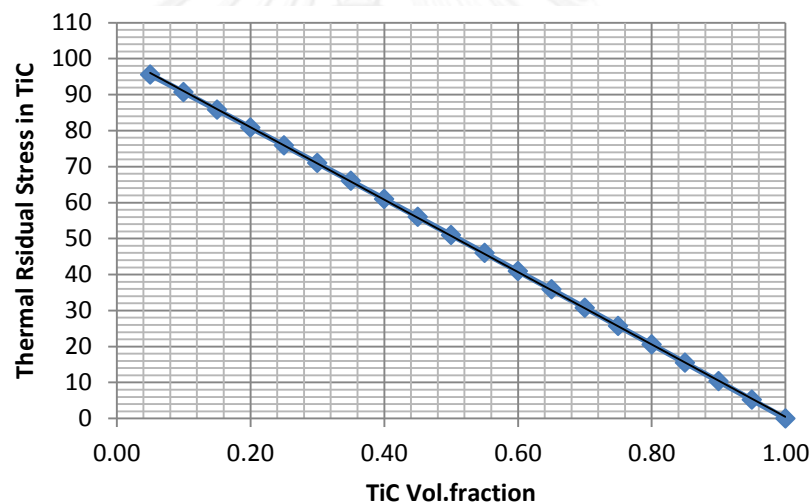
ตัวอย่าง การคำนวณความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจาก 25 °C ถึง 1350 °C

$$\sigma_p = \frac{(\alpha_p - \alpha_m)\Delta T}{\left(\frac{1}{3K_p}\right) + \frac{1}{4(1-f)G_m} + \frac{f}{3(1-f)K_m}}$$

$$\sigma_p = \frac{(8.5 - 8.0)(1623 - 298)}{\left(\frac{1}{3 * 224}\right) + \frac{1}{4(1 - 0.35)197} + \frac{0.35}{3(1 - 0.35)252}}$$

$$\sigma_p = 66.2 \text{ MPa}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเฟส Al_2O_3 และ TiC มีค่าใกล้เคียงกัน จึงเกิดความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal residual stress) ในปริมาณต่ำ ความเค้นตกค้างเนื่องจากอุณหภูมิของอนุภาคไทเทเนียมคาร์ไบด์ในวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์มีความสัมพันธ์แบบผกผันเชิงเส้นตรงกับสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผสม ดังภาพ 4.1



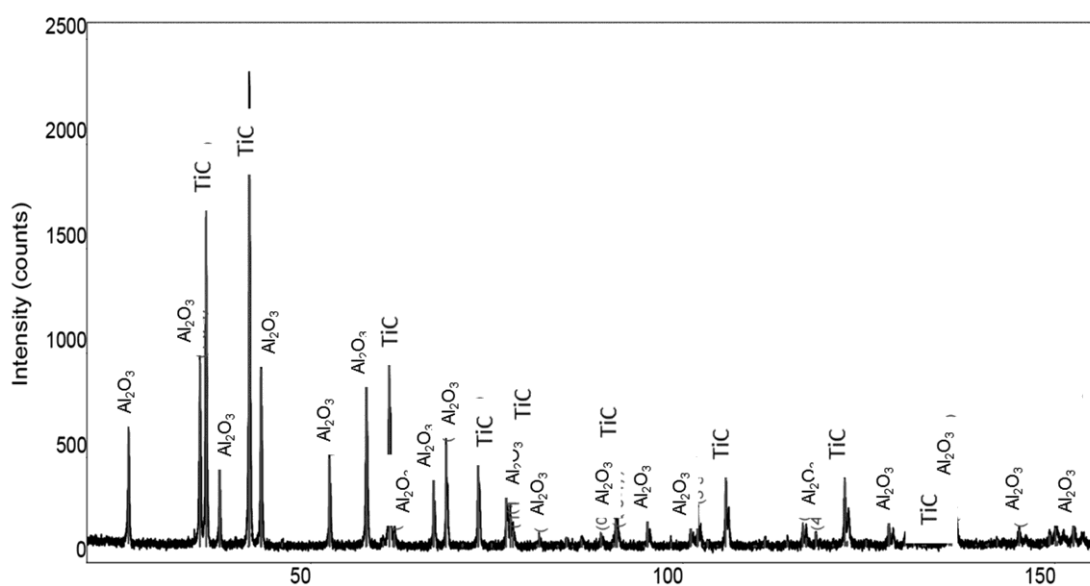
ภาพที่ 4.1 อัตราส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคต่อความเค้นตกค้างเนื่องจากความร้อน

4.2 ผลการวิเคราะห์สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบเอ และห้องทดสอบบี กับข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตแผ่นเวเฟอร์ให้ผลสอดคล้องกัน ดังนี้ วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์มีส่วนประกอบของเฟสอะลูมินาต่อเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์อยู่ร้อยละ 65 ต่อ ร้อยละ 35 โดยปริมาตร โดยทำการวิเคราะห์แบบริทเวลด (Rietveld analysis) ซึ่งเป็นทั้งการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) และการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis) สำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ สามารถระบุเฟสในวัสดุผสมได้จากการเทียบตำแหน่งจุดยอดของความเข้ม (มุม 2θ) กับ รูปแบบพื้นฐานการเลี้ยวเบน

(Diffraction pattern) จากฐานข้อมูล JCPDS สำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ สามารถระบุอัตราส่วนโดยปริมาตรของเฟสในวัสดุผสมได้จากการเทียบความเข้มสัมพัทธ์ (Relative intensity) ระหว่าง 2 เฟสในวัสดุผสม ซึ่งการวิเคราะห์แบบรีทเวลดนี้ จะใช้การเทียบจากการคำนวณค่าเฉลี่ยความเข้มของสัญญาณจากรูปแบบการเลี้ยวเบนทั้งหมด (Full Pattern Analysis)

หมายเหตุ JCPDS เป็นฐานข้อมูลที่รวบรวมรูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งแสดงคุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic Peak) ของวัสดุแต่ละชนิด ขึ้นกับโครงสร้างและสารประกอบของวัสดุนั้นๆ



ภาพที่ 4.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์

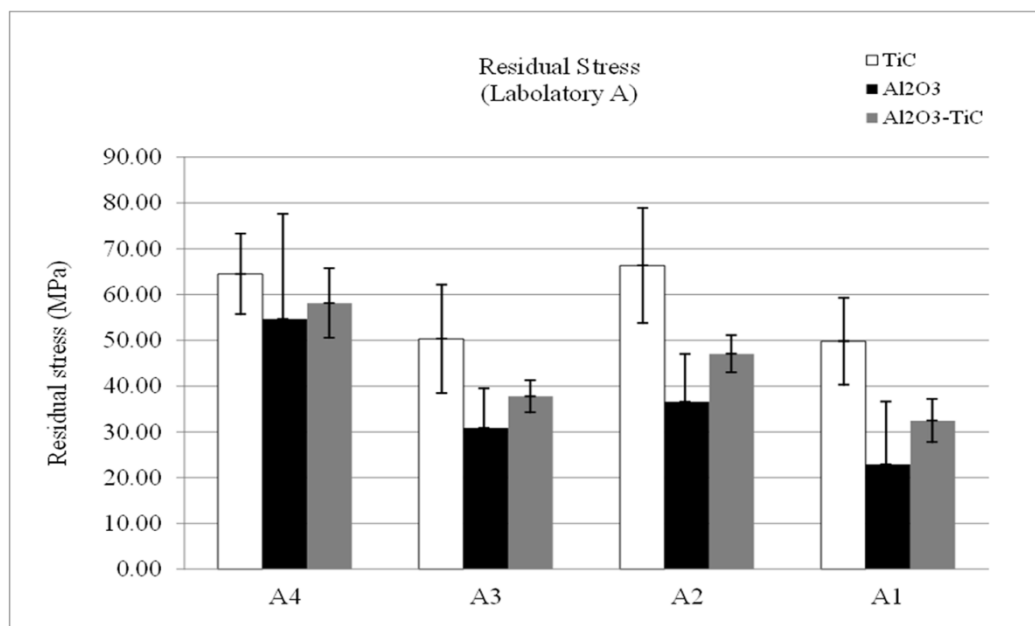
4.3 ผลการวัดปริมาณความเค้นตกค้างบนผิววัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์

4.3.1 ชิ้นงานสี่เหลี่ยมจัตุรัสแผ่นบาง ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบเอ

ผลการทดสอบ พบว่า เฟสอะลูมินามีปริมาณความเค้นตกค้างประมาณ 36 - 55 MPa ส่วนเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์มีปริมาณความเค้นตกค้างประมาณ 50 - 66 MPa ทำให้ผลการคำนวณปริมาณความเค้นตกค้างของวัสดุผสม ตามกฎของการผสม (Rule of Mixing) ที่หาค่าเฉลี่ยโดยปริมาตร มีค่าอยู่ระหว่าง 32 - 58 MPa ที่ระดับความลึกการวิเคราะห์ที่ 1 - 17 ไมครอนจากผิวชิ้นงาน

จากกราฟ $\sin^2 \psi$ เมื่ออ่านค่ามุม 2θ ที่วัดได้จากห้องทดสอบเอ มีความละเอียดของการวัด (Resolution) ตำแหน่งยอดความเข้มอยู่ที่ระดับ 0.001 องศา (ทศนิยมตำแหน่งที่ 3) ดูรายละเอียดในภาคผนวก ข

จะเห็นว่าปริมาณความเค้นตกค้างในเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์จะมากกว่าปริมาณความเค้นตกค้างในเฟสอะลูมินาเสมอ โดยความเค้นตกค้างในเฟสอะลูมินามีค่าเป็น 50 – 70 เปอร์เซ็นต์ ของความเค้นตกค้างในเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ ดังภาพที่ 4.3 นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่า ผลการวัดความเค้นตกค้างบนเฟสอะลูมินามีความเบี่ยงเบนสูง ดังนั้น การทดสอบบนชิ้นงานสไลเดอร์ จึงเลือกทดสอบเฉพาะปริมาณความเค้นตกค้างในเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ เท่านั้น เพื่อลดความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากข้อมูลของอะลูมินาที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูง (Standard Deviation) และเพิ่มความเร็วในการทดสอบ โดยต่อไป จะสามารถอนุมานปริมาณความเค้นตกค้างของเฟสอะลูมินาจากการวัดปริมาณความเค้นตกค้างของเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์แทน ทั้งนี้ วัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์เป็นวัสดุผสมที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) กล่าวคือ มีการกระจายตัวของเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์อยู่ในเนื้อพื้นอะลูมินาอย่างสม่ำเสมอ อีกทั้ง การวัดปริมาณความเค้นตกค้างด้วยวิธี $\sin^2\psi$ เป็นการวัดความเค้นตกค้างในระดับมหภาค (Macro-residual stress) นั่นคือ เป็นการวัดค่าเฉลี่ยของปริมาณความเค้นตกค้างตั้งแต่ระดับพื้นผิวลงไปจนถึงระยะความลึกวิเคราะห์ของการเลี้ยวเบนเอกซเรย์ (Depth of analysis)



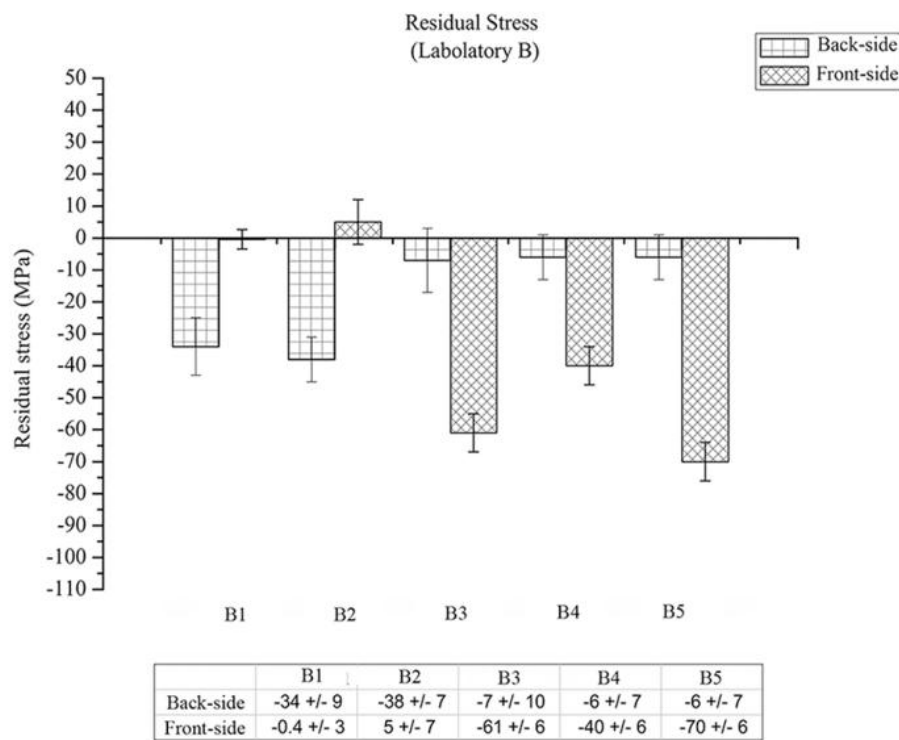
Sample Set	TiC	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ -TiC
G1	64.49 +/- 8.78	54.63 +/- 22.95	58.12 +/- 7.58
G2	50.30 +/- 11.83	30.84 +/- 8.65	37.75 +/- 3.49
G3	66.33 +/- 12.56	36.56 +/- 10.42	47.04 +/- 4.04
G4	49.79 +/- 9.51	22.91 +/- 13.68	32.46 +/- 4.72

ภาพที่ 4.3 ความเค้นตกค้างของเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ อะลูมินา และความเค้นตกค้างของวัสดุผสมที่ได้จากการคำนวณตามกฎการผสม

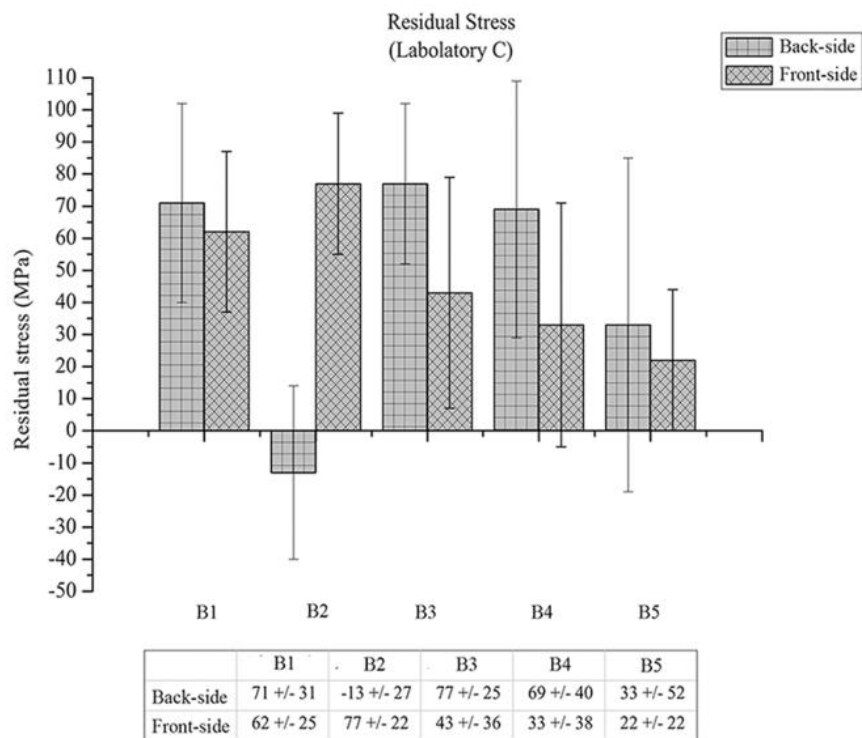
4.3.2 ชิ้นงานสไลเดอร์ ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบบี และ ซี

ผลการวิเคราะห์ปริมาณความเค้นตกค้างในเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ จากเครื่องทดสอบ บี และ ซี สามารถอ่านได้จากกราฟ ภาพที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ

ปริมาณความเค้นตกค้างในเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์ จากห้องทดสอบบี ภาพที่ 4.4 พบว่าบนพื้นผิวด้านที่ถูกเจียรไนออกของแต่ละกระบวนการจะมีค่าสูง อยู่ที่ประมาณ 35 – 70 MPa ส่วนด้านตรงข้ามจะมีค่าต่ำอยู่ที่ประมาณ 0 – 7 MPa โดยเป็นความเค้นตกค้างแบบอัด (Compressive residuals stress) ยกเว้น ที่พื้นผิวด้านหน้าของชิ้นงาน บี 2 (ซึ่งเป็นผิวด้านที่ไม่ได้ถูกขัดเจียรไนในกระบวนการ บี 2) ให้ค่าความเค้นเฉลี่ยเป็นความเค้นดึง ทั้งนี้อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนเนื่องจากค่าความเค้นตกค้างที่ต่ำ (5 MPa) ในขณะที่มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลสูง (± 7) กล่าวคือค่าจริงสามารถอยู่ระหว่างความเค้นอัดและความเค้นดึงได้ นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล จากห้องทดสอบบี มีค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบจากห้องทดสอบ เอ และ ห้องทดสอบซี

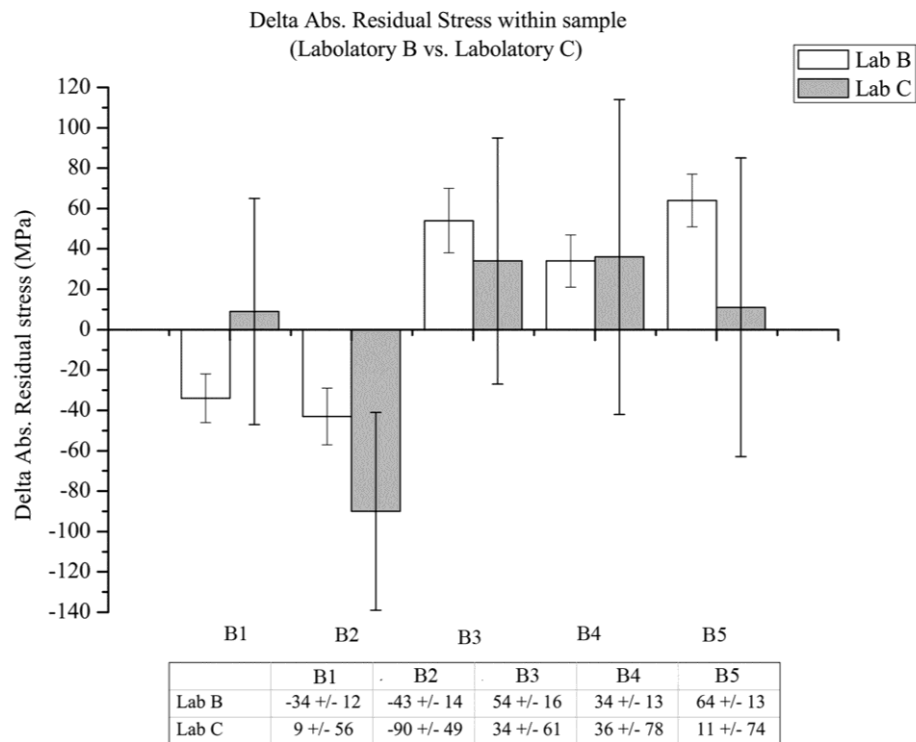


ภาพที่ 4.4 ข้อมูลความเค้นตกค้างบนพื้นผิวด้านหลังและด้านหน้าของสไลเดอร์จากห้องทดสอบบี



ภาพที่ 4.5 ข้อมูลความเค้นตกค้างบนพื้นผิวด้านหลังและด้านหน้าของสไลเดอร์จากห้องทดสอบซี

ปริมาณความเค้นตกค้างในเพลไทเทเนียมคาร์ไบด์ จากห้องทดสอบซี ดังภาพที่ 4.5 พบว่า ส่วนใหญ่ค่าความเค้นตกค้างบนพื้นผิวด้านหลังของแต่ละกระบวนการจะมีค่าสูงกว่าผิวด้านหน้า ซึ่งความเค้นตกค้างมีค่า 13 – 77 MPa และส่วนใหญ่เป็นความเค้นตกค้างแบบดึง (Tensile residual stress) ยกเว้น กลุ่ม บี 2 ที่ผิวด้านหลัง (ผิวด้านที่ถูกขัดเจียรระโนในกระบวนการ บี 2) ให้ค่าความเค้นตกค้างเป็นความเค้นอัด ทั้งนี้อาจเกิดจากความคลาดเคลื่อน เนื่องจากค่าความเค้นตกค้างที่ต่ำ (13 MPa) แต่มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลสูง (± 27) ทำให้ค่าสามารถอยู่ระหว่างความเค้นอัด และความเค้นดึงได้นอกจากนี้ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากห้องทดสอบบี มีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบจากห้องทดสอบบี และห้องทดสอบเอ เนื่องจาก ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลการวัดความเค้นตกค้างที่ผิวด้านหลังและด้านหน้าจากห้องทดสอบซี มีส่วนคาบเกี่ยวกัน ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากห้องทดสอบซี จึงไม่สามารถให้ค่าเพื่อใช้ในการแยกแยะความแตกต่างของปริมาณความเค้นตกค้างระหว่างผิวด้านหลังและด้านหน้าได้ อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนข้อมูลที่ได้จากห้องทดสอบบี ไม่มีส่วนคาบเกี่ยวของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จึงสามารถใช้เพื่อแยกแยะความแตกต่างของปริมาณความเค้นตกค้างระหว่างผิวด้านหลังและด้านหน้าได้ อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลต่างของความเค้นตกค้าง (Δ Residual stress) ระหว่างผิวด้านหลังและด้านหน้าของข้อมูลที่ได้จากห้องทดสอบ บี และ ซี พบว่า ข้อมูลผลต่างของความเค้นตกค้างจากห้องทดสอบบี และห้องทดสอบซี ยังคงแสดงแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังภาพที่ 4.6



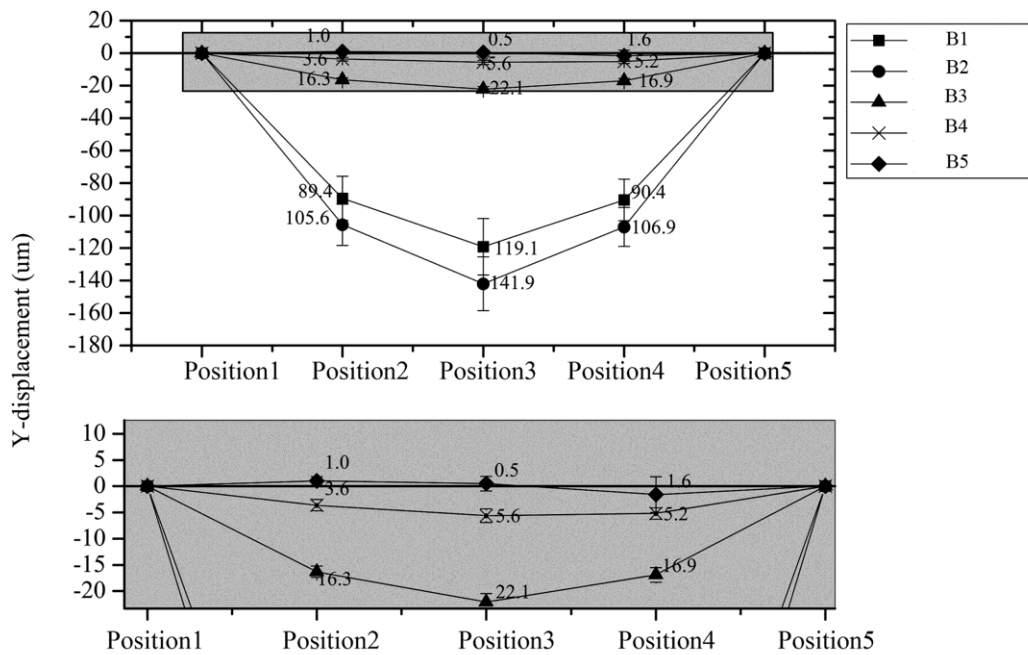
*Delta Abs. Residual Stress within sample = Abs. Res Stress on Backside - Abs. Res Stress on Frontside

ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความต่างของความเค้นตกค้างระหว่างผิวด้านล่างและด้านบน (Δ Residual stress) ของข้อมูลจากห้องทดสอบบี และห้องทดสอบซี

ความละเอียดของการวัด (Resolution) ด้วยเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบบี สามารถอ่านค่าการเปลี่ยนตำแหน่งจุดยอดความเข้ม หรือ มุม 2θ (2θ shifted) อยู่ที่ความละเอียดระดับ 0.0001 องศา (ทศนิยมตำแหน่งที่ 4) ในขณะที่เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ของห้องทดสอบซี สามารถอ่านค่าการเปลี่ยนตำแหน่งของมุม มุม 2θ อยู่ที่ความละเอียดระดับ 0.001 องศา (ทศนิยมตำแหน่งที่ 3) จะเห็นได้ว่าค่าความละเอียดของการวัดมีความสอดคล้องกับความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

4.4 ผลการวัดความโค้งงอของสไลเดอร์

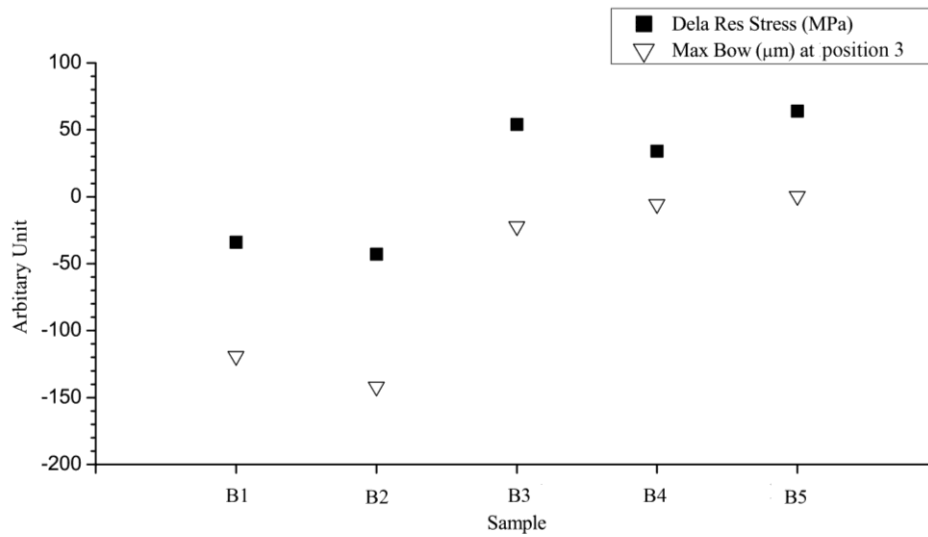
ระยะโค้งงอเฉลี่ยของสไลเดอร์ กลุ่ม บี1 เท่ากับ 119.2 ± 17.4 ไมครอน, กลุ่ม บี2 เท่ากับ 141.9 ± 16.6 ไมครอน, กลุ่ม บี3 เท่ากับ 22.1 ± 5.7 ไมครอน, กลุ่ม บี4 เท่ากับ 5.6 ± 1.28 ไมครอน, กลุ่ม บี5 เท่ากับ 0.5 ± 1.35 ไมครอน ดังภาพที่ 4.7



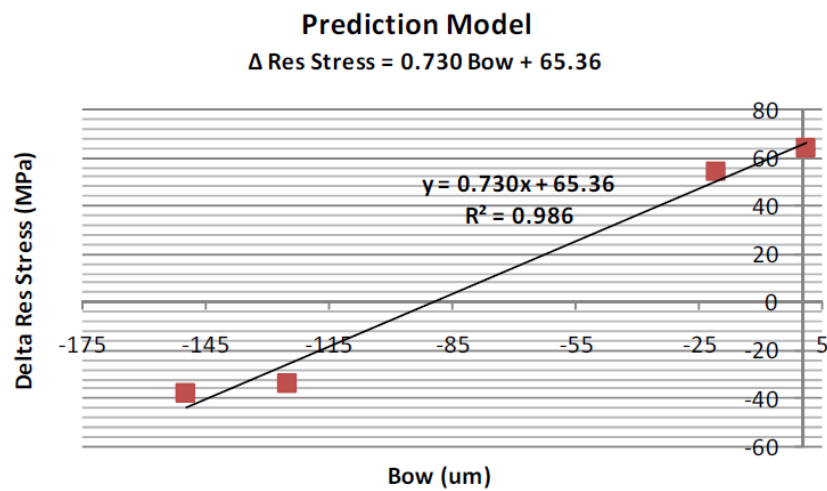
ภาพที่ 4.7 ระยะโก่งงอของสไลเดอร์หลังกระบวนการเจียรระโน ปี 1 ปี 2 ปี 3 ปี 4 และ ปี 5

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเค้นตกค้างกับความโก่งงอ

การเปรียบเทียบผลต่างของความเค้นตกค้างระหว่างพื้นผิวกับระยะโก่งงอ แสดงในภาพที่ 4.8 พบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ยกเว้น กระบวนการปี 4 ที่มีแนวโน้มไปในทิศทางตรงกันข้าม ภาพที่ 4.9 แสดงแบบจำลองทำนาย ผลต่างความเค้นตกค้างบนพื้นกับระยะการโก่งงอ ใช้สำหรับกระบวนการ ปี 1 ปี 2 ปี 3 และ ปี 5 ยกเว้น ปี 4 ด้วยสมการความสัมพันธ์ Δ Residual Stress (MPa) = 0.730 Bow (μ m) + 65.36



ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบแนวโน้มระหว่างค่าความต่างของความเค้นตึงกับความโค้งงอของสไลเดอร์



ภาพที่ 4.9 แบบจำลองทำนาย ผลต่างความเค้นตึงบนพื้นผิวกับระยะการโก่งงอ ปี 1 ปี 2 ปี 3 และ ปี 5

4.6 ผลการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบหัวกดวิกเกอร์

4.6.1 ความแข็ง (HV1) ระยะรอยแตก (c) 1 และความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC})

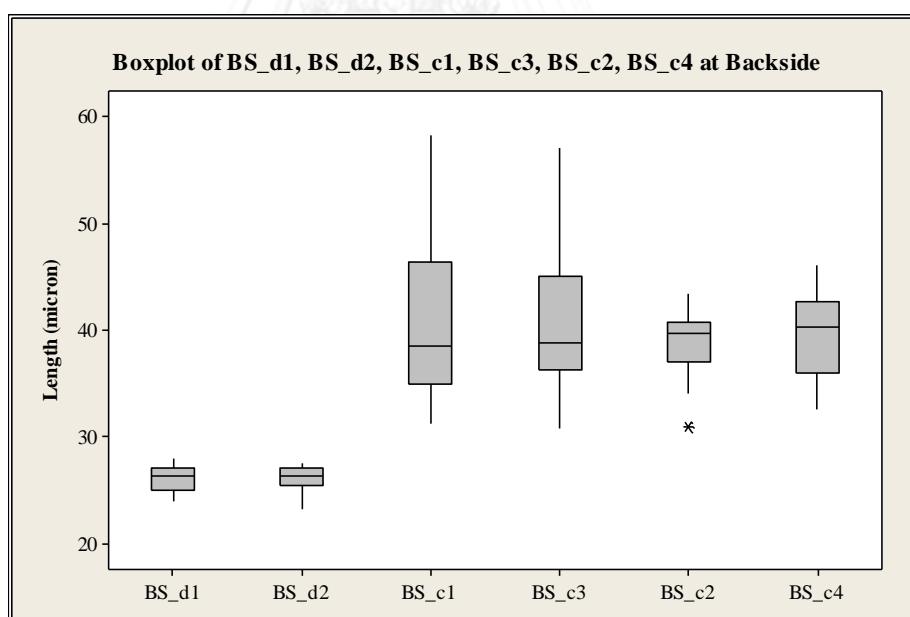
ผลค่าความแข็ง (HV) ระยะรอยแตก (c) และความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC}) แสดงในตาราง 4.2 โดยลักษณะรอยแตกส่วนใหญ่เป็นแบบรอยแตกครึ่งเหรียญเพนนี (Half-penny like crack) ดังภาพที่ 2.17 แผนภูมิแบบกล่องของข้อมูลระยะเส้นทแยงมุม และระยะรอยแตกที่ผิว

ด้านหน้า ดังภาพที่ 4.11 แสดงว่า มีข้อมูลอยู่จำนวน 4 ข้อมูลที่มีค่าสูงผิดปกติไปจากกลุ่ม (Outlier data) พบว่า เป็นข้อมูลระยะรอยแตกของชิ้นงาน ปี 4 ที่ผิวด้านหน้าที่มีความยาวที่มากกว่าปกติ ทำให้ความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC}) ที่ผิวด้านหน้าของกลุ่ม ปี4 (B4) ที่ค่าต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ

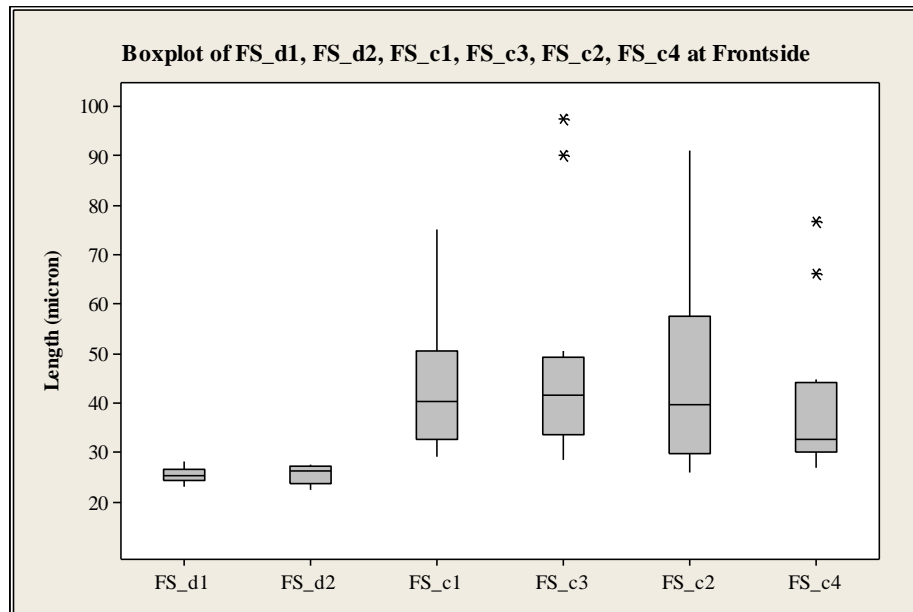
ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็ง (Hardness) ระยะรอยแตก (c) ความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC})

Sample	Back side					Front side				
	Hardness (GPa)	C_{ave} (μm)	Ave c/a	*Ave. K_{IC} ($\text{Mpa m}^{1/2}$)	**Ave. K_{IC} ($\text{Mpa m}^{1/2}$)	Hardness (GPa)	C_{ave} (μm)	Ave c/a	*Ave. K_{IC} ($\text{Mpa m}^{1/2}$)	**Ave. K_{IC} ($\text{Mpa m}^{1/2}$)
B1	26.02	36.8	2.79	2.72	2.90	29.03	30.5	2.44	3.41	3.64
B2	26.64	34.8	2.66	2.71	3.15	31.02	34.7	2.87	2.72	2.87
B3	25.25	47.9	3.57	1.86	1.98	25.49	35.6	2.67	2.97	3.17
B4	27.92	41.3	3.23	2.21	2.36	31.25	67.1	5.59	1.17	1.25
B5	27.58	39.7	3.09	2.36	2.51	26.22	46.8	3.56	1.93	2.06

* E =390 GPa, ** E=443 GPa



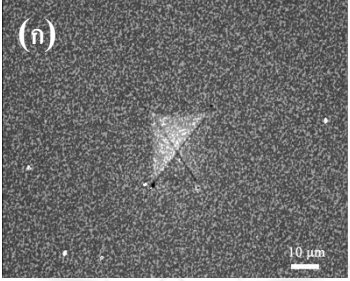
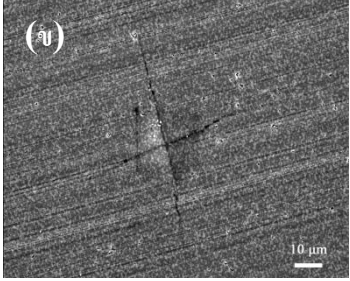
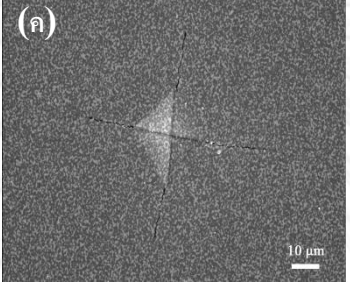
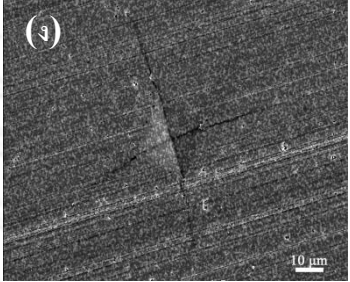
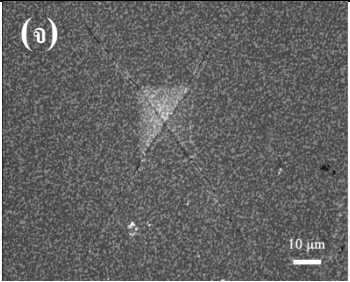
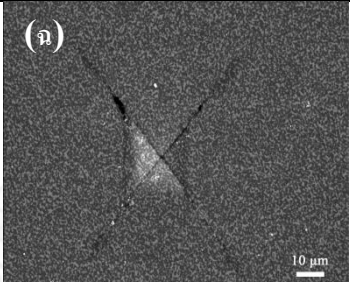
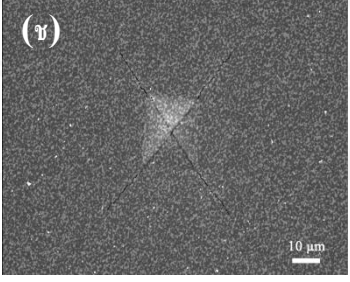
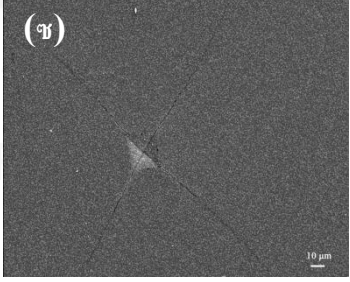
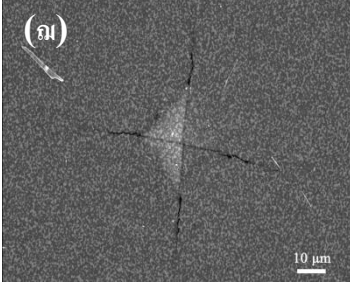
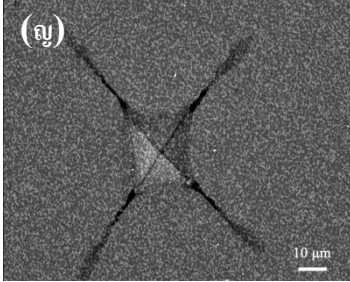
ภาพที่ 4.10 แผนภูมิแบบกล่องของข้อมูลระยะเส้นทแยงมุมและระยะรอยแตกของพื้นผิวด้านหลัง



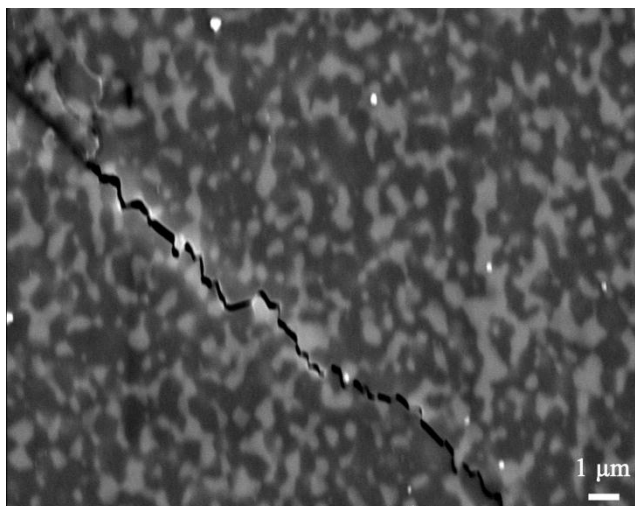
ภาพที่ 4.11 แผนภูมิแบบกล่องของข้อมูลระยะเส้นทแยงมุม และระยะรอยแตก
ของพื้นผิวด้านหน้า

4.6.2 ลักษณะรอยแตก (Crack characterization)

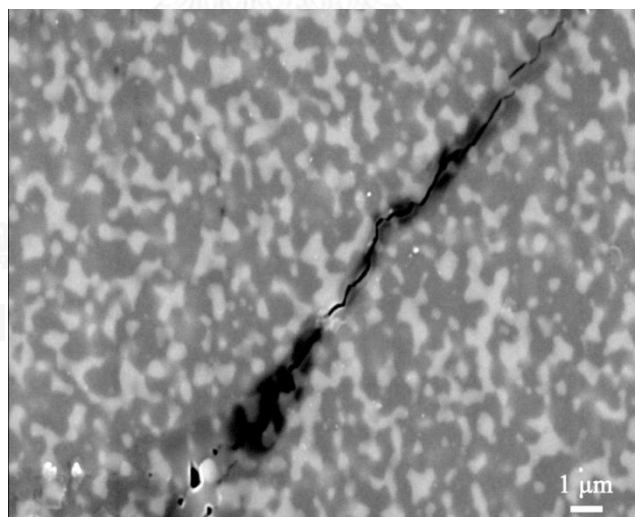
ตารางที่ 4.3 ลักษณะรอยแตก

ชิ้นงาน	พื้นผิวด้านหลัง	พื้นผิวด้านหน้า
ปี 1	(ก) 	(ข) 
ปี 2	(ค) 	(ง) 
ปี 3	(จ) 	(ฉ) 
ปี 4	(ช) 	(ซ) 
ปี 5	(ฑ) 	(ฒ) 

จากตารางที่ 4.3 ภาพ (ก) – ภาพ (ฉ) และ ภาพ (ฉ) – ภาพ (ญ) เป็นภาพที่กำลังขยาย 1000 เท่า ยกเว้นภาพ (ซ) เป็นภาพที่กำลังขยาย 500 เท่า เห็นได้ว่า ระยะรอยแตกที่ผิวด้านหน้าของ ชิ้นงาน ปี 4 ยาวกว่าชิ้นงานกลุ่มอื่นๆ นอกจากนี้ ยังพบว่า ที่ผิวด้านหน้าของกลุ่ม ปี 3 เกิดการหลุด ตัวของพื้นผิวบริเวณมุมของรอยกด ภาพ (ฉ) และ การหลุดตัวรุนแรงขึ้นสำหรับผิวด้านหน้าของ ชิ้นงานกลุ่ม ปี 5 ซึ่งพบทั้งการหลุดตัวที่บริเวณมุมรอยกดและบริเวณโดยรอบรอยแตกด้วย ภาพ (ญ)

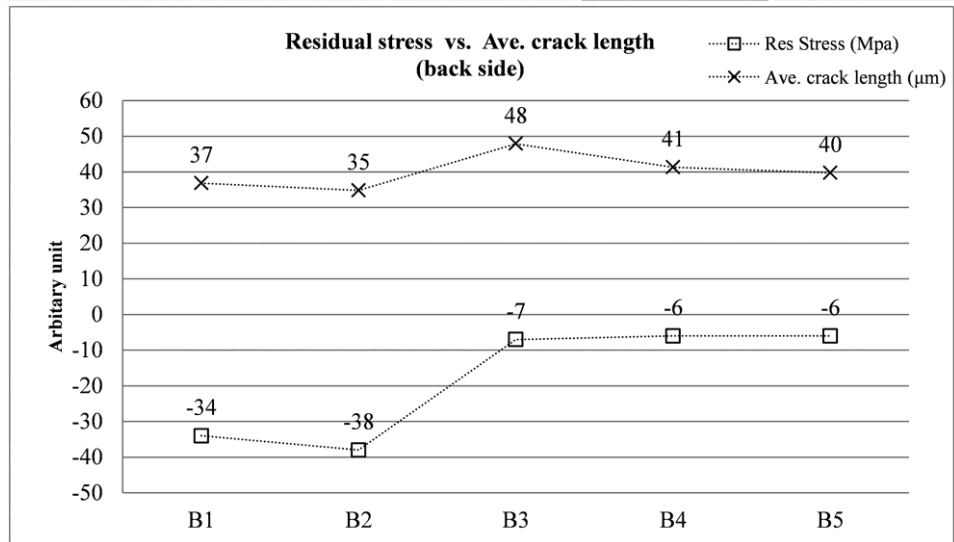
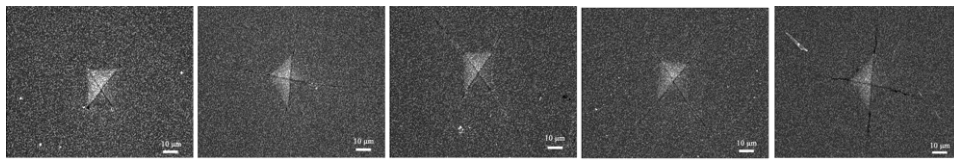


ภาพที่ 4.12 ภาพขยายลักษณะรอยแตก รอยแตกตามขอบเกรน และรอยแตกผ่าเกรน

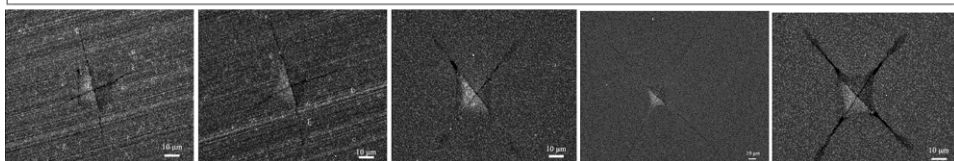
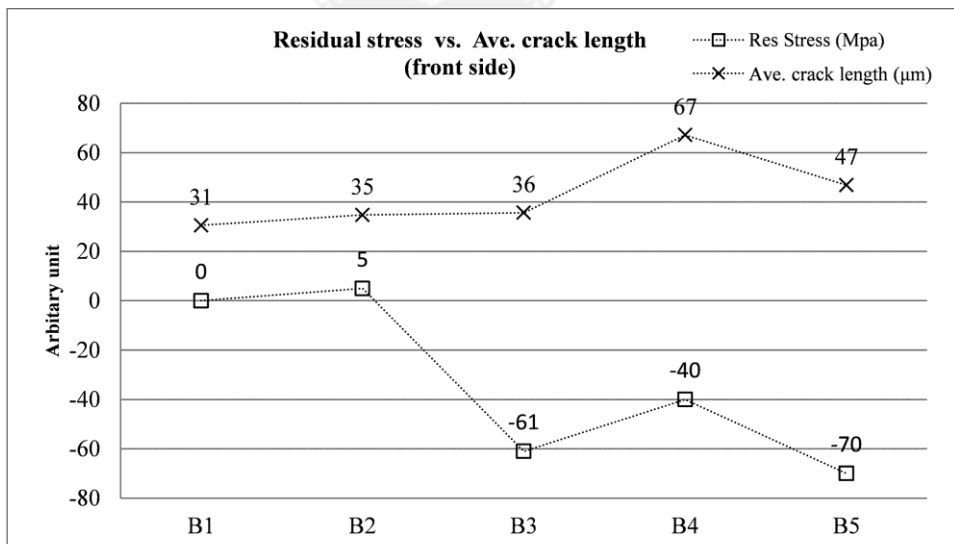


ภาพที่ 4.13 ภาพขยายลักษณะรอยแตกที่มีการหลุดตัวที่มุมรอยกด และรอบรอยแตก

4.7 ผลการเปรียบเทียบความเค้นตกค้างกับระยะรอยแตก



ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบความเค้นตกค้างกับระยะรอยแตกของพื้นผิวด้านหลัง



ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบความเค้นตกค้างกับระยะรอยแตกของพื้นผิวด้านหน้า

จากภาพที่ 4.14 และ 2.4.15 พบว่า ลักษณะรอยแตกปกติ สามารถพบบนพื้นผิวที่มีความเค้นตกค้างเป็นความเค้นอัดระหว่าง 0 – 38 MPa ระยะรอยแตกจะลดลงเมื่อความเค้นตกค้างพื้นผิวมีขนาดความเค้นอัดเพิ่มขึ้น ลักษณะรอยแตกที่ยาวกว่าปกติ ที่พบบนผิวด้านหน้ากลุ่ม บี 4 ซึ่งมีความเค้นตกค้างที่ผิวเป็นความเค้นอัด 40 MPa ลดลงจากระบวนการก่อนหน้า คือ บี 3 ซึ่งมีความเค้นตกค้างที่ผิวเป็นความเค้น 60 MPa กล่าวคือกระบวนการเจียระไน บี 4 ทำให้ความเค้นตกค้างที่ผิวเป็นความเค้นอัดลดลง (หรือเสมือนให้ความเค้นดึง) เมื่อเทียบกับกระบวนการก่อนหน้า โดยระยะรอยแตกที่มีความยาวเพิ่มขึ้น เกิดจากความทนทานการแตกร้าวลดลง ลักษณะรอยแตกที่มีการหลุดตัว สามารถพบบนผิวด้านหน้าของกลุ่ม บี 3 และ ผิวด้านหน้าของกลุ่ม บี 5 เมื่อพิจารณาความเค้นตกค้างของพื้นผิวดังกล่าว พบว่า มีความเค้นอัดที่ 60 MPa และ 70 MPa ตามลำดับ แสดงว่า ผิวที่มีความเค้นตกค้างแบบอัดอยู่ในช่วงดังกล่าว อาจเกินกว่าขอบเขตความเครียดยืดหยุ่น (Elastic strain limit) ของวัสดุไปมาก จนทำให้เนื้อวัสดุข้างๆรอยแตกเกิดการเสียรูปแบบยุบตัวลงไป (Collapse) กล่าวคือ วัสดุมีความพร้อมที่จะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรในระดับมหภาค เช่น การแตกร้าว (crack) รอยบิ่น (chip) ได้ง่าย เนื่องจากมีการสะสมพลังงานจากระบวนการเจียระไนไว้มาก

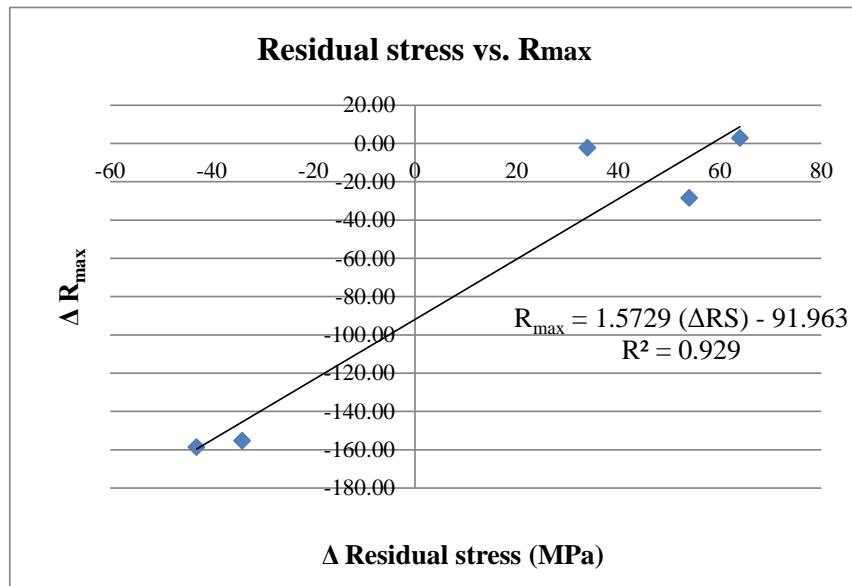
4.8 ผลการวัดความหยาบผิว

ผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average, R_a) ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของรากกำลังสอง (Root mean square, RMS or R_q) และ ค่าความหยาบผิวความลึกสูงสุดของร่องความหยาบ (Maximum Roughness, R_{max}) ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดความหยาบผิว

Sample	R_a (nm)				R_q (nm)				R_{max} (nm)			
	Ave. BS	SD BS	Ave. FS	SD FS	Ave. BS	SD BS	Ave. FS	SD FS	Ave. BS	SD BS	Ave. FS	SD FS
B1	2.26	0.04	3.82	2.92	2.82	0.05	9.53	0.92	34.46	34.46	189.80	189.80
B2	0.31	0.07	4.27	2.08	0.39	0.09	8.12	0.28	9.12	9.12	167.80	167.80
B3	0.25	0.03	2.44	0.09	0.32	0.03	3.03	0.11	5.10	5.10	35.24	35.24
B4	0.23	0.02	0.60	0.16	0.29	0.02	0.73	0.19	6.83	6.83	9.13	9.13
B5	0.33	0.03	0.33	0.08	0.42	0.03	0.43	0.10	10.16	10.16	7.29	7.29

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวกับผลต่างความเค้นตกค้าง



ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างความเค้นตกค้างกับความหยาบผิว

พบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความหยาบผิวความลึกสูงสุดของร่องความหยาบ (R_{\max}) กับผลต่างความเค้นตกค้าง ดังกราฟการกระจายซึ่งแสดงในภาพที่ 4.16 พบว่าสามารถใช้แบบจำลองทำนายเพื่อใช้สำหรับกระบวนการ ปี 1 ปี 2 ปี 3 ปี 4 และ ปี 5 ดังสมการความสัมพันธ์ $\Delta R_{\max} (\text{nm}) = 1.5729 \Delta \text{Res Stress (MPa)} - 91.963$

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การวิเคราะห์ปริมาณความเค้นตกค้างด้วยการทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ ด้วยเทคนิค $\sin^2\psi$ การติดตั้งอุปกรณ์และกำหนดพารามิเตอร์ในการทดสอบ ดังรายละเอียดเช่นเดียวกับเครื่องทดสอบของห้องทดสอบปีนั้น มีความเหมาะสม และสามารถให้ความละเอียดเพียงพอ ที่จะใช้ทดสอบชิ้นงานสไลเดอร์ เพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับปริมาณความเค้นตกค้างต่อการเปลี่ยนแปลงการโก่งงอ ทั้งนี้ สามารถให้ความละเอียดของข้อมูลที่ระดับ 0.0001 องศา (ทศนิยมตำแหน่งที่ 4) โดยปัจจัยหลักที่สำคัญ คือ ชนิดของตัวรับสัญญาณ (Detector) ที่สามารถทำให้มีอัตราการรับความเข้มของสัญญาณ (Intensity count) สูง เป็นต้น

5.1.2 ความเค้นตกค้างจากกระบวนการเจียรระโน ที่วัดได้จากวิธีการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์ด้วยเทคนิค $\sin^2\psi$ มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความโก่งงอของสไลเดอร์ โดยผลต่างของความเค้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงความโก่งงอ สำหรับกระบวนการเจียรระโน ปี 1 ปี 2 ปี 3 และ ปี 5 ที่ใช้ผลิตชิ้นงานทดสอบ สามารถใช้แบบจำลองทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความต่างของความเค้นตกค้างและการโก่งงอ $\Delta\text{Residual Stress (MPa)} = 0.730 \text{ Bow } (\mu\text{m}) + 65.36$ ได้ ยกเว้นกระบวนการ ปี 4 เนื่องจากสภาวะความเค้นที่พื้นผิวมีความแตกต่างไปจากกระบวนการอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ สามารถตรวจสอบอย่างง่ายโดยดูจากลักษณะรอยแตกจากการทดสอบความแข็งจุลภาคแบบหัวกดวิกเกอร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรเลือกวิเคราะห์ปริมาณความเค้นตกค้างบนเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์เพื่อเป็นตัวแทนของวัสดุผสมอะลูมินา-ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เพื่อความถูกต้องของข้อมูล ความรวดเร็ว และความประหยัดในการวิเคราะห์ปริมาณความเค้นตกค้าง โดยสามารถอนุมานปริมาณความเค้นตกค้างบนเฟสอะลูมินาได้เนื่องจากจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-0.7 เท่าของปริมาณความเค้นตกค้างบนเฟสไทเทเนียมคาร์ไบด์

5.2.1 ความละเอียดของเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณความเค้นตกค้างด้วย ด้วยเทคนิค $\sin^2\psi$ ควรมีความละเอียดของการวัดการเปลี่ยนตำแหน่ง 2θ ที่ระดับ 0.0001 องศา (ทศนิยมตำแหน่งที่ 4)

รายการอ้างอิง



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. C, T., *Final technical report microstructure microstructural and mechanical property characterization of ALTiC wafers*. 2012.
2. K.F. Caia, D.S.M., N. Axenb, R. Manyatsab, *Preparation, microstructures and properties of Al₂O₃-TiC composites*. *Ceramics International*, 2001. **28**(2002): p. 7.
3. Ge., R.-X.S.J.L.Y.-s.Y.H.-y., *Toughening mechanism and microstructure of Al₂O₃-TiC-Co composites*. *Materials Science and Engineering*, 2011(A528): p. 7.
4. J. Echeberria, J.T., J.Y. H, Butler, F. Castro, *Sinter-HIP of alpha-alumina powders with sub-micron grain sizes*. *Journal of the European Ceramic Society* 2002(22): p. 9.
5. Rowe, W.B., *Principles of Modern Grinding Technology*, ed. 1st. 2009, USA: William Andrew.
6. V.C.Venkatesh, S.i., *Precision Engineering*, ed. 1st. 2007, New Deli: McGrew-Hill.
7. Gatzen, H.H., *Rigid disk slider micromaching challenges to meet microtribology needs*. *Tribology International*, 2000(33): p. 6.
8. Hans H. Gatzen, J.C.M., Michel K.Schwabe, *Precision machining of rigid disk head slider*. *IEEE transactions on magnetic*, 1996. **32**(3): p. 9.
9. J.P.Davin, *Surface integrity in machining* ed. 1st. 2010, London Dordrecht Heidelberg New York: Springer.
10. E.Dieter, G., *Mechanical Metallurgy*, ed. 3rd. 1988, Singapore: McGrew-Hill.
11. B.D.Cullity, S.R.S., *Element of X-ray diffraction*, ed. 3rd. 2001, Singapore: McGrewHill.
12. Prevey, P.S., *A method of determining the elastic properties of alloys in selected crystallographic direction for X-ray diffraction residual stress measurement*. *Advances in X-ray analysis*, 1997. **20**: p. 10.
13. Bhadeshia, P.J.W.a.H.K.D.B., *Overview residual stress part-1 measurement techniques*. *Materials science and Technology*, 2001(17): p. 11.
14. Withers, P.J. and H.K.D.H. Bhadeshia, *Overview Residual stress Part 2 Nature and origins*. *Materials Science and Technology*, 2001. **17**(10): p. 366.
15. AXS, B., *Stress 1.1 EDSstress1.1*. Bruker advanced X-Ray solution: Diffrac Plus Stress. 2004: BRUKER AXS.
16. Serbena, F.C. and E.D. Zannotto, *Internal residual stresses in glass-ceramics : A review*. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012. **358**: p. 9.
17. N.S. Rossini, M.D., K.Y.Benyenis, *Method of measuring residual stress in componants*. *Materials and design*, 2012(35): p. 17.

18. Fitzpatrick, M.E., et al., *Determination of Residual Stresses by X-ray Diffraction in Measurement Good Practice Guide, 2*, Editor. 2005.
19. G.R. Anstis, P.C., B.R.Lawn and D.B. Marshall, *A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I, Direct crack measurements* Journal of American Ceramics Society, 1981. **69**(9): p. 6.
20. Materials, A.S.f.T.a., *ASTM-C1327-03*, in *Standard test method for Vickers indentation hardness of advance ceramics*. 2005. p. 8.
21. A.Moradkhai and H.Baharvandi, *Determination of fracture toughness using the area of micro-crack tracks left in brittle materials by Vicker indentation test*. Journal of Advance Ceramics, 2013. **2**(1): p. 15.
22. J. Gong, Z.Z., Z. Guan, *On local crack resistance of Al₂O₃-TiC composite evaluated by direct indentation method* Journal of European Ceramic Society, 2011(21): p. 6.
23. B.R. Lawn, A.G.E., *Elastic/Plastic indentation damage in ceramics: The Median/Radian crack system* Journal of American Ceramics Society, 1980. **63**(9-10): p. 8.
24. Q.Chen, W.G.M.e.a., *Effect of Young's modulus evolution on residual stress measurement of thermal barrier coating by X-ray diffraction* Applied Surface Science, 2010(256): p. 16.
25. M.Szutkawska, *Modified indentation methods for fracture toughness determinatio of Alimina ceramic 2005*, 13th international scientific conference.
26. Gregorova, W.P.G.T.E., *Effective elastic properties of Alumina-Zirconia composite ceramics-Part 3. Calculation of elastic moduli of polycrystalline alumina and zirconia from monocystal data*. Ceramics, 2004. **48**(2): p. 8.
27. Lide, D.R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, ed. E.t. Edition. 1998, Boca Raton: CRC Press.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลการวัดปริมาณความเค้นตกค้างจากห้องทดสอบเอ บี และ ซี

ห้องทดสอบเอ

Sample Set A	TiC (4 2 2)		Al ₂ O ₃ (4 0 10)		Al ₂ O ₃ -TiC	
	Residual stress (MPa)	S.D (+) (MPa)	Residual stress (MPa)	S.D (+) (MPa)	Residual stress (MPa)	S.D (+) (MPa)
A4	64.49	8.78	54.63	22.95	58.12	7.58
A3	50.30	11.83	30.84	8.65	37.75	3.49
A2	66.33	12.56	36.56	10.42	47.04	4.04
A1	49.79	9.51	22.91	13.68	32.46	4.72

ห้องทดสอบบี

Sample Set B (Lab B)	TiC (4 2 0)			
	Back side (MPa)		Front side (MPa)	
	Residual stress (MPa)	S.D (+) (MPa)	Residual stress (MPa)	S.D (+) (MPa)
B1	-34	9	-0.4	3
B2	-38	7	5	7
B3	-7	10	-61	6
B4	-6	7	-40	6
B5	-6	7	-70	6

ห้องทดสอบซี

Sample Set B (Lab C)	TiC (4 2 0)			
	Back side (MPa)		Front side (MPa)	
	Residual stress (MPa)	S.D (+) (MPa)	Residual stress (MPa)	S.D (+) (MPa)
B1	71	31	62	25
B2	-13	27	77	22
B3	77	25	43	36
B4	69	40	33	38
B5	33	52	22	22

ภาคผนวก ข

ข้อมูลและกราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบเอ บี และ ซี

ข้อมูลจากห้องทดสอบเอ

$\sin^2\psi$	ψ (deg)	2 θ (deg)							
		TiC (4 2 2)				Al ₂ O ₃ (4 0 10)			
		A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
0.0	0.00	121.758	121.760	121.759	121.756	145.175	145.183	145.182	145.180
0.1	-18.43	121.751	121.747	121.748	121.748	145.168	145.179	145.172	145.176
0.2	-26.57	121.745	121.743	121.747	121.747	145.172	145.172	145.178	145.172
0.3	-33.21	121.744	121.745	121.746	121.745	145.156	145.171	145.162	145.171
0.4	-39.23	121.744	121.743	121.742	121.746	145.164	145.163	145.171	145.167
0.5	-45.00	121.741	121.739	121.740	121.739	145.160	145.159	145.167	145.158

ข้อมูลจากห้องทดสอบบี

$\sin^2\psi$	ψ (deg)	2 θ (deg)									
		TiC (4 2 0)									
		B1_FS	B1_BS	B2_FS	B2_BS	B3_FS	B3_BS	B4_FS	B4_BS	B5_FS	B5_BS
0	0.00	105.7059	105.6817	105.7211	105.6848	105.6813	105.6954	105.6900	105.6931	105.6813	105.6984
0.1	-18.43	105.7062	105.6800	105.7198	105.6845	105.6870	105.6912	105.6928	105.6903	105.6863	105.6956
0.2	-26.57	105.7067	105.6820	105.7202	105.6872	105.6895	105.6931	105.6948	105.6914	105.6900	105.6967
0.3	-33.21	105.7071	105.6836	105.7185	105.6878	105.6910	105.6934	105.6954	105.6921	105.6920	105.6971
0.4	-39.23	105.7066	105.6854	105.7181	105.6894	105.6940	105.6931	105.6962	105.6918	105.6945	105.6979
0.5	-45.00	105.7057	105.6890	105.7208	105.6940	105.6970	105.6964	105.7004	105.6941	105.6975	105.6990

ข้อมูลจากห้องทดสอบซี

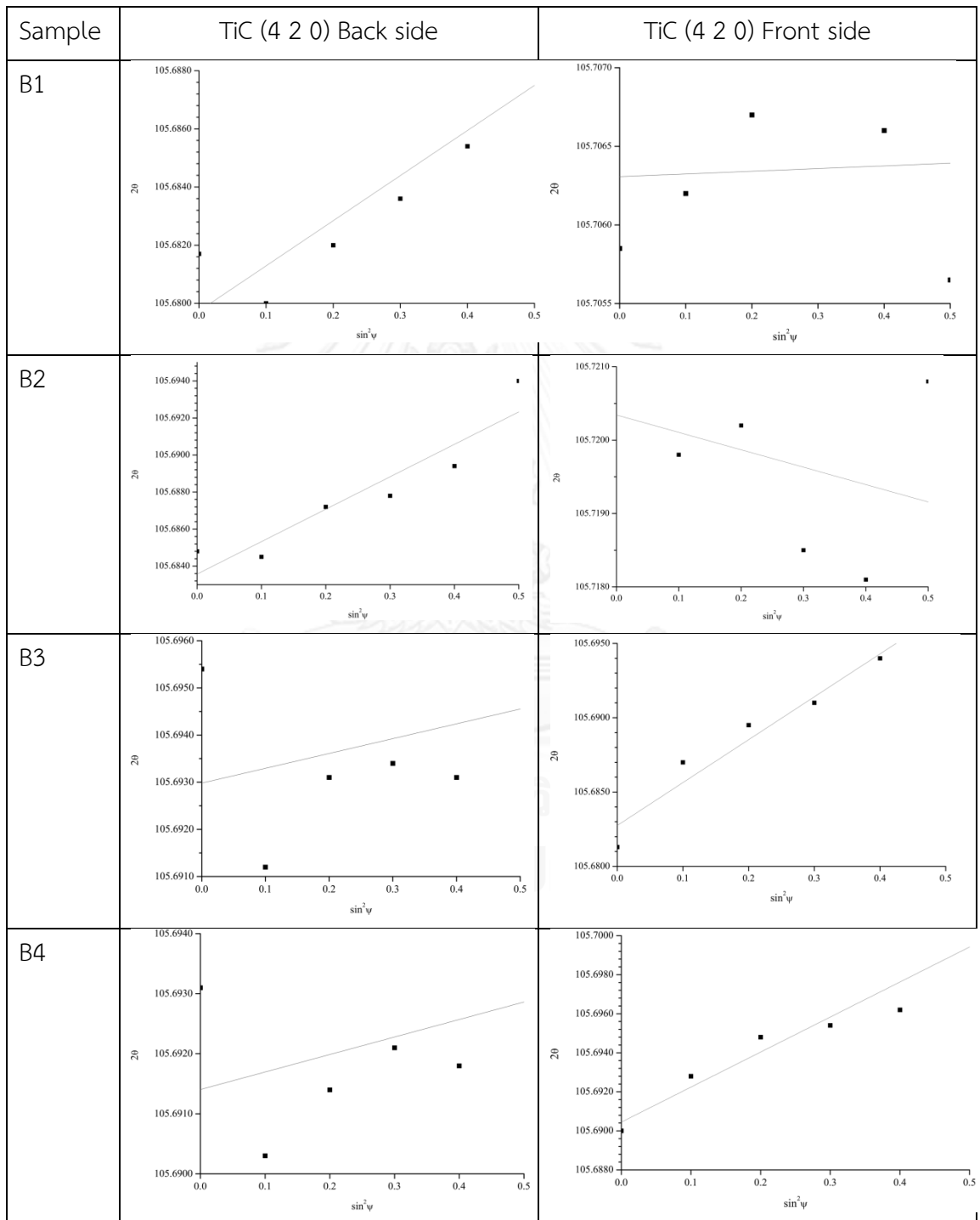
$\sin^2\psi$	ψ (deg)	2 θ (deg)									
		TiC (4 2 2)									
		B1_FS	B1_BS	B2_FS	B2_BS	B3_FS	B3_BS	B4_FS	B4_BS	B5_FS	B5_BS
0	0.00	121.637	121.636	121.633	121.626	121.630	121.625	121.630	121.632	121.629	121.631
0.1	-18.43	121.624	121.623	121.636	121.621	121.608	121.608	121.611	121.605	121.618	121.613
0.2	-26.57	121.619	121.626	121.625	121.622	121.607	121.608	121.613	121.615	121.613	121.636
0.3	-33.21	121.614	121.608	121.618	121.620	121.607	121.601	121.607	121.604	121.620	121.615
0.4	-39.23	121.619	121.618	121.625	121.618	121.611	121.601	121.609	121.605	121.619	121.601
0.5	-45.00	121.617	121.630	121.612	121.633	121.611	121.601	121.619	121.608	121.619	121.627

ภาคผนวก ข (ต่อ)

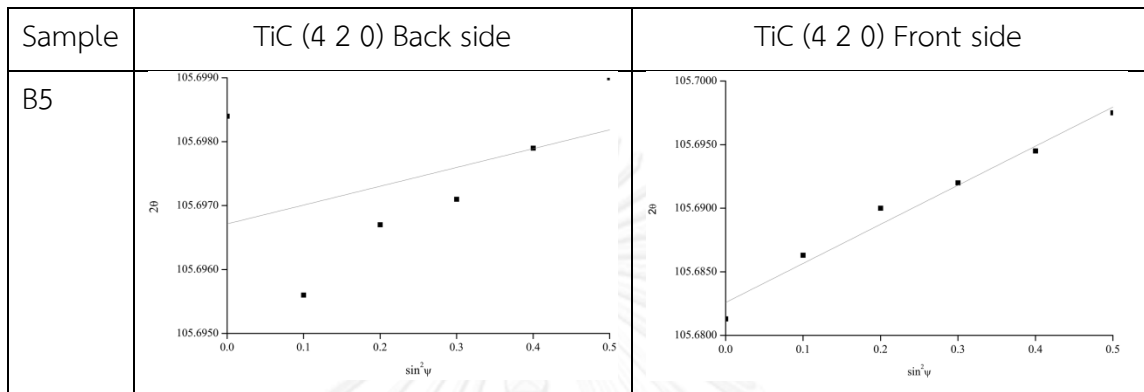
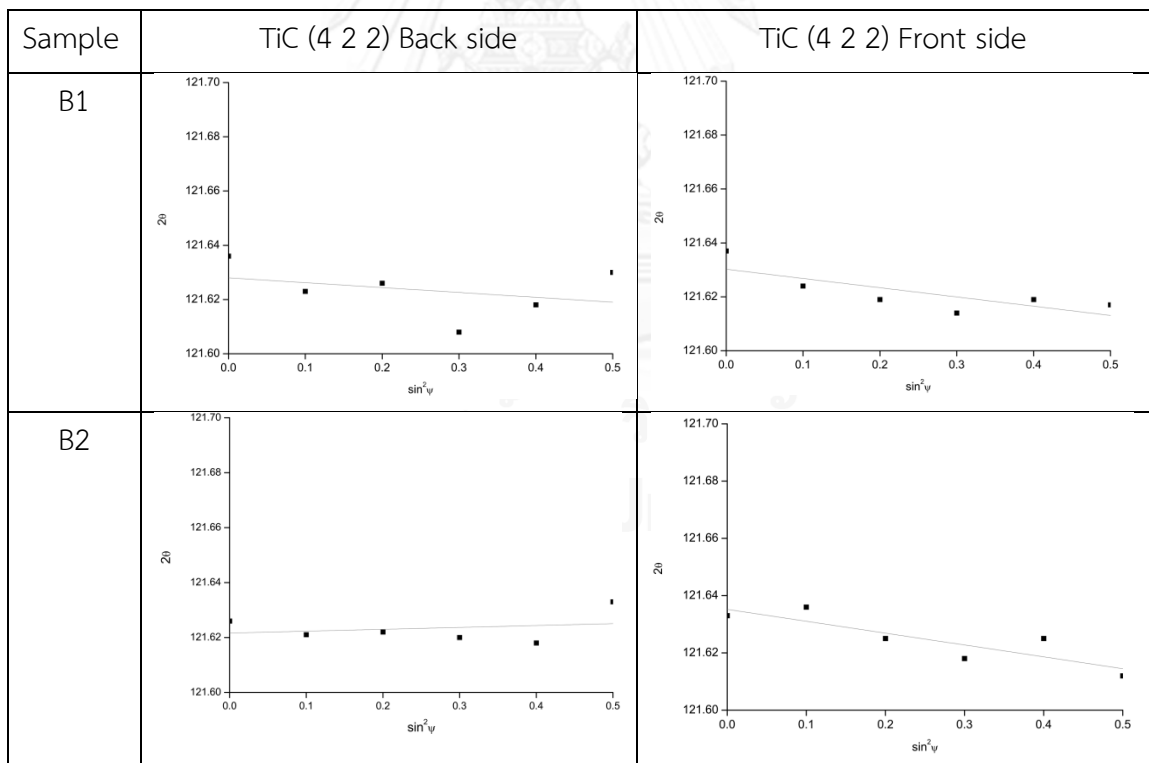
ข้อมูลและกราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบเอ บี และ ซีกราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบเอ

Sample	TiC	Al ₂ O ₃
A1		
A2		
A3		
A4		

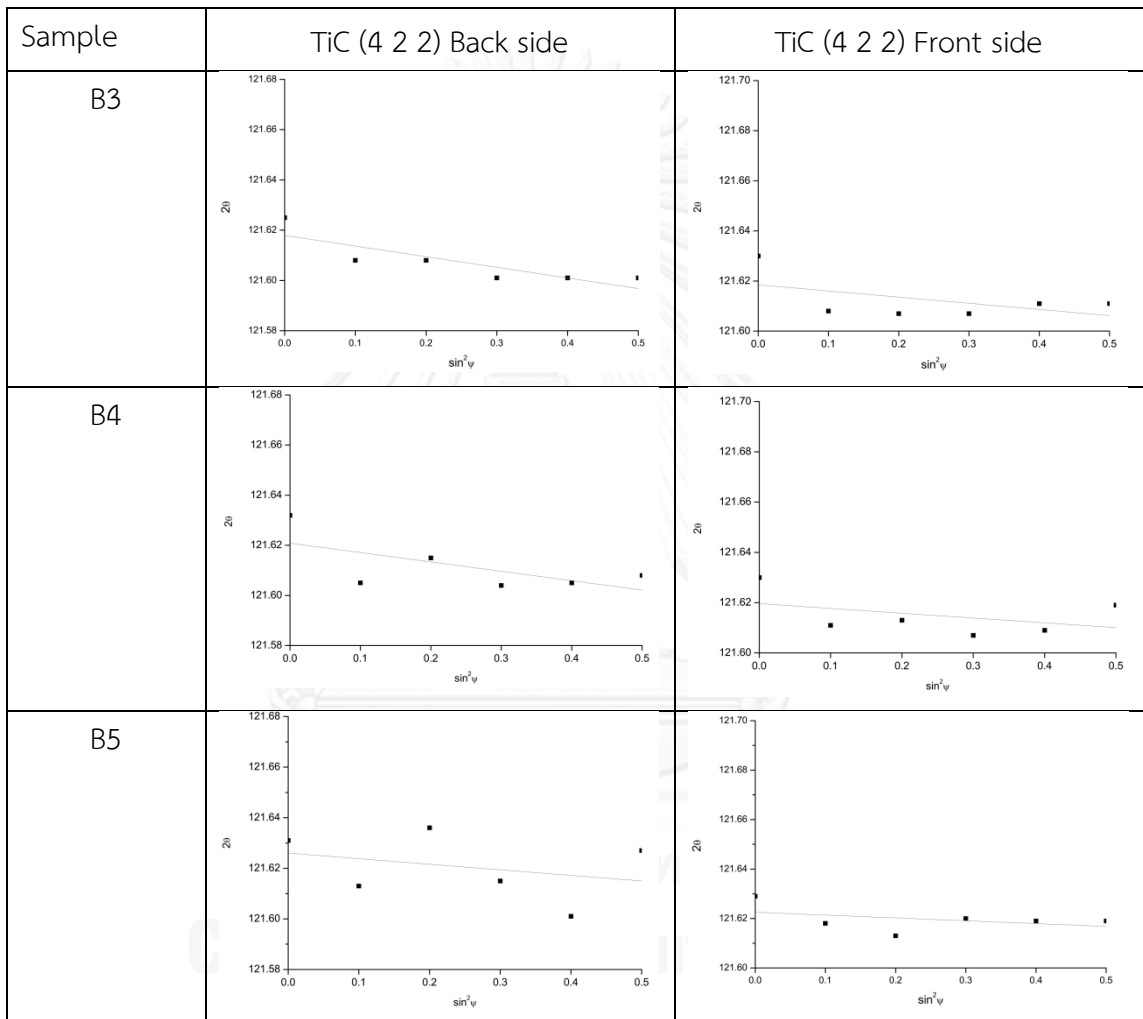
ภาคผนวก ข (ต่อ)

ข้อมูลและกราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบเอ บี และ ซีกราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบบี

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ข้อมูลและกราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบเอ บี และ ซีกราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบบี (ต่อ)กราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบซี

ภาคผนวก ข (ต่อ)

ข้อมูลและกราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบเอ บี และ ซีกราฟ $\sin^2\psi$ จากห้องทดสอบซี (ต่อ)

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณและกราฟระยะความลึกวิเคราะห์ของวิธีการเลี้ยวเบนของเอกซเรย์

ระยะความลึกวิเคราะห์ของวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์คำนวณตามรายละเอียดในหัวข้อ 2.12.3.1 โดยงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าอัตราส่วน G_x มีค่าเท่ากับ 0.950 ซึ่งหมายถึง ค่าผลรวมความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดการเลี้ยวเบนตั้งแต่พื้นผิวถึงระดับความลึกวิเคราะห์ (x) มีค่าคิดเป็น 95% ของผลรวมความเข้มทั้งหมดที่เกิดการเลี้ยวเบนตั้งแต่พื้นผิวถึงระยะอนันต์ ค่าคงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (Linear absorption coefficient) สำหรับการคำนวณของเฟสไทเทเนียมและอะลูมินา มีค่า 789.4 cm^{-1} และ 126.2 cm^{-1} ตามลำดับ อัตราส่วนผสมโดยปริมาตรของไทเทเนียมคาร์ไบด์และอะลูมินาในวัสดุผสม เท่ากับ 0.35 และ 0.65 ตามลำดับ ตัวอย่างการคำนวณใช้ข้อมูลจากห้องทดสอบเอ

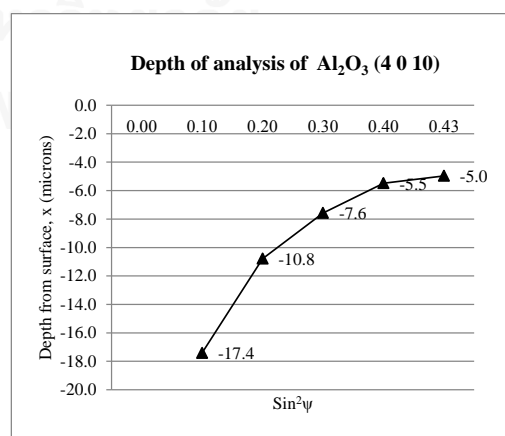
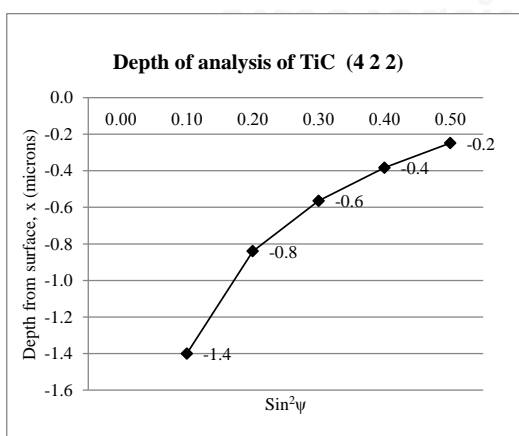
- ชิ้นงาน เอ 1 เฟส TiC (4 2 2)

2 θ (deg)	Data No	$\text{Sin}^2\psi$	ψ (deg)	θ (deg)	ω (deg)	$\psi+\theta$ (deg)	$\psi-\theta$ (deg)	$1 / \text{Sin}(\psi+\theta)$	$1 / \text{Sin}(\psi-\theta)$	x (cm)	x (μm)
121.756	6	0.00	0	60.878	60.878	60.878	-60.878	1.145	-1.145	-	-
121.748	5	0.10	18.43	60.874	42.444	79.304	-42.444	1.018	-1.482	-0.000140	-1.40
121.747	4	0.20	26.57	60.874	34.304	87.444	-34.304	1.001	-1.774	-0.000084	-0.84
121.745	3	0.30	33.21	60.873	27.663	94.083	-27.663	1.003	-2.154	-0.000056	-0.56
121.746	2	0.40	39.23	60.873	21.643	100.103	-21.643	1.016	-2.711	-0.000038	-0.38
121.739	1	0.50	45	60.870	15.870	105.870	-15.870	1.040	-3.657	-0.000025	-0.25

- ชิ้นงาน เอ 1 เฟส Al_2O_3 (4 0 10)

2 θ (deg)	Data No	$\text{Sin}^2\psi$	ψ (deg)	θ (deg)	ω (deg)	$\psi+\theta$ (deg)	$\psi-\theta$ (deg)	$1 / \text{Sin}(\psi+\theta)$	$1 / \text{Sin}(\psi-\theta)$	x (cm)	x (μm)
145.180	6	0.00	0	72.590	72.590	72.590	-72.590	1.048	-1.048	-	-
145.176	5	0.10	18.43	72.588	54.158	91.018	-54.158	1.000	-1.234	-0.001741	-17.41
145.172	4	0.20	26.57	72.586	46.016	99.156	-46.016	1.013	-1.390	-0.001078	-10.78
145.171	3	0.30	33.21	72.586	39.376	105.796	-39.376	1.039	-1.576	-0.000757	-7.57
145.167	2	0.40	39.23	72.584	33.354	111.814	-33.354	1.077	-1.819	-0.000548	-5.48
145.158	1	0.43	41	72.579	31.579	113.579	-31.579	1.091	-1.910	-0.000497	-4.97

ตัวอย่างกราฟระยะความลึกวิเคราะห์ของวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณความเค้นตกค้าง

B5_FS from fit least square				When E=443890 Mpa, v=0.174				Case 2: when E=390000 Mpa, v=0.2				
$\sin^2 \psi$	ψ	Y(2 θ)	θ	Cot θ at $\psi=0$	K_c (Mpa)	K (Mpa)	-Cot $\theta_0/2$ (deg)	Stress (Mpa)	K_c (Mpa)	K (Mpa)	-Cot $\theta_0/2$ (deg)	Stress (Mpa)
0	0	105.6825800	52.84129000	0.757906091	378100.51	-2500.75	-0.006614	-76.87	325000.00	-2149.54	-0.006614	-66.08
0.1	18.43	105.6856540	52.84282700									
0.2	26.57	105.6887280	52.84436400									
0.3	33.21	105.6918020	52.84590100									
0.4	39.23	105.6948760	52.84743800									
0.5	45	105.6979500	52.84897500									

B5_BS from fit least square				When E=443890 Mpa, v=0.174				Case 2: when E=390000 Mpa, v=0.2				
$\sin^2 \psi$	ψ	Y(2 θ)	θ	Cot θ at $\psi=0$	K_c (Mpa)	K (Mpa)	-Cot $\theta_0/2$ (deg)	Stress (Mpa)	K_c (Mpa)	K (Mpa)	-Cot $\theta_0/2$ (deg)	Stress (Mpa)
0	0	105.6967100	52.84835500	0.757711972	378100.51	-2500.11	-0.006612	-7.36	325000.00	-2148.99	-0.006612	-6.32
0.1	18.43	105.6970043	52.84850215									
0.2	26.57	105.6972986	52.84864930									
0.3	33.21	105.6975929	52.84879645									
0.4	39.23	105.6978872	52.84894360									
0.5	45	105.6981815	52.84909075									

หมายเหตุ

- เมื่อเปลี่ยนค่ามอดูลัสยืดหยุ่นที่ใช้ในการคำนวณจาก 443890 MPa เป็น 390000 MPa ค่าความเค้นตกค้างที่คำนวณได้จะมีค่าลดลงประมาณ 15%
- ปริมาณความเค้นตกค้างที่อ่านจากเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของเอกซ์เรย์ (ภาคผนวก ก) และค่าที่ได้จากการคำนวณ (ภาคผนวก ง) มีค่าใกล้เคียงกัน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสินีนารถ ธรรมสุนทร เกิดเมื่อวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2525 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร เมื่อปี 2548 หลังการศึกษา ได้เข้าทำงานกับบริษัท ฮานา เซมิคอนดักเตอร์ (กรุงเทพ) จำกัด เป็นเวลา 5 ปี จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2553



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY