

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวัดความเค้นคงค้างโดยใช้เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์



26
กพ 31
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 81604
วัน,เดือน,ปี... 19 มี.ย. 2551

b. 11933529
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Residual Stress Measurement using X-ray Diffractometer



Miss.Kaesinee Meebunmak
Miss.Thanisara Trithara

**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of Requirement for the Degree of
Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**


Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การวัดความเค้นคงค้างโดยใช้เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
นักศึกษา นางสาวเกศิณี มีบุญมาก
 นางสาวธนิตรา ตริธารา
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษเรื่องนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ผศ.ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์	
กรรมการ	รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา	
กรรมการ	ดร.ปิติพร ถนอมงาม	
กรรมการที่ปรึกษา	ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม	


 (รองศาสตราจารย์วิชาญ เดชิตธีระ)
 หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การวัดความเค้นคงค้างโดยใช้เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
นักศึกษา	นางสาวเกศิณี มีบุญมาก นางสาวธนิตรา ตรีธารา
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการวัดความเค้นโดยใช้เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ รุ่น Bruker AXS Model D8 Discover โดยจะทำการทดลองสารตัวอย่างที่เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนทั้งหมด 3 ตัวอย่างด้วยกัน โดยจะทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอนที่เป็นเหล็กแผ่น (Steel Plates), เหล็กท่อกลม (Carbon Steel Tubes) และเหล็กท่อกวี่เหลี่ยม หรือเหล็กกล่อง (Carbon Steel Square Pipes)

จากการทดลองพบว่าเหล็กแผ่น (Steel Plates), เหล็กท่อกลม (Carbon Steel Tubes) และเหล็กท่อกวี่เหลี่ยม หรือเหล็กกล่อง (Carbon Steel Square Pipes) มีความเค้นคงค้าง (Residual Stress) อยู่ในสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นผลมาจากการผลิต โดยกระบวนการรีดเย็น ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ความเค้นที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบการคำนวณ โดยใช้สมการความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและมุม $\sin^2(\Psi)$ จะเห็นว่าความเค้นที่ได้จากการทดลองนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ คือ ที่ มุม $\Phi = 0$ เหล็กแผ่น , เหล็กท่อกลมและเหล็กท่อกวี่เหลี่ยมมีค่าความเค้นคงค้าง 30 ± 25 MPa, -28 ± 29 MPa และ 74 ± 23 MPa ตามลำดับ และที่มุม $\Phi = 90$ เหล็กแผ่น , เหล็กท่อกลมและเหล็กท่อกวี่เหลี่ยมมีค่าความเค้นคงค้าง 70 ± 53 MPa, -25 ± 60 MPa และ 64 ± 23 MPa ตามลำดับ

Special Project Title	Residual Stress Measurement using X-ray Diffractometer
Name	Miss Kaesinee Meebunmak Miss Thanisara Trithara
Department	Applied Physics Faculty of Science
Program	Applied Physics – Instrument of Science and Industry
Academic Year	2007
Special Project Advisor	Asst. Prof. Sahlay Lekchaum

ABSTRACT

This senior project studied the stress measurement using Bruker AXS Model D8 Discover XRD. The sample used for measurement include steel plate, carbon steel tube and carbon steel square pipe

The results show that steel plate, carbon steel tube and carbon steel square pipe have residual stress because effect of cold-finished production. The measured stress compared to the value calculated from the plot between strain and $\sin^2 \psi$ are in good agreement . At $\varphi = 0^\circ$ residual stress of steel plate, carbon steel tube and carbon steel square pipe are 30 ± 25 MPa, -28 ± 29 MPa and 74 ± 23 MPa ,respectively. At $\varphi = 90^\circ$, residual stress of steel plate, carbon steel tube and carbon steel square pipe are 70 ± 53 MPa, -25 ± 60 MPa and 64 ± 23 MPa respectively.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถเสร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความสนับสนุน และช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ผู้ซึ่งให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา และยังไขข้อสงสัยต่างๆ ทำให้ลูกศิษย์มีความรู้เพิ่มเติมเพื่อนำไปใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้ รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ พี่มานพ ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และคำแนะนำการใช้เครื่องเครื่องการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer) ของ Bruker AXS Model D8 Discover และให้ความรู้ในการทำงานของระบบการวัดความเค้นของเครื่องเอ็กซ์เรย์คิฟเฟร็กโตมิเตอร์ รวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่สีกส์ทุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจและเป็นเพื่อนที่แสนดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชา ตั้งแต่การศึกษภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจน กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นางสาวเกศิณี มีบุญมาก

นางสาวธนิตรา ศรีธรา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 หลักการทั่วไปของเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer)	6
2.2 การวัดความเค้นคงค้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	12
2.2.1 บทนำของความเค้นคงค้าง (Introduction to residual stress)	12
2.2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์ความเค้นคงค้างด้วยรังสีเอ็กซ์	14
2.3 เหล็กกล้า (steel)	19
2.3.1 บทนำของเหล็กกล้าคาร์บอน	19
2.3.2 โครงสร้างผลึกของเหล็กกล้า	28
2.3.2.1 Body Centered Cubic (BCC)	28
2.3.2.2 Hexagonal Close – Packed (HCP หรือ CPH)	32
2.3.3 ผลของกรรมวิธีต่อโครงสร้างจุลภาค	36
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	40
3.1 หลักการของเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของBruker AXS Model D8 Discover	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ Residual stress	44
3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง (Sample preparation)	47
3.4 การวัดและวิเคราะห์ความเค้นคงค้างของสารตัวอย่าง	50
3.4.1 ศึกษาการปรับแต่ง (Alignment)และการปรับเทียบ(Calibration) ของเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของระบบการวัดความเค้น	50
3.4.2 วิธีการทดลอง	55
3.4.3 การวิเคราะห์โดยการคำนวณ	67
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	69
4.1 การปรับเทียบของระบบการวัด	69
4.1.1 ผลการวัดความเค้นคงค้างโดยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	69
4.1.2 การวิเคราะห์โดยการคำนวณของทั้งสเดน	72
4.2 การวัดแลวิเคราะห์เหล็กแผ่น,เหล็กท่อกลมและเหล็กท่อสี่เหลี่ยม	78
4.2.1 ผลการวัดความเค้นคงค้างโดยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	78
4.2.2 การวิเคราะห์โดยการคำนวณของเหล็กแผ่น, เหล็กท่อกลม และ เหล็กท่อสี่เหลี่ยม	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	103
5.1 สรุปผลการทดลอง	103
5.2 ข้อเสนอแนะ	104
เอกสารอ้างอิง	105

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงหลักการหาระนาบแบเรก์ในผลึกลูกบาศก์	32
ตารางที่ 4.1 แสดงการหาค่า $d_{\phi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ของทั้งสแกนเมื่อพิจารณาที่ $\text{Phi} (\phi) = 0^\circ$	73
ตารางที่ 4.2 แสดงการหาค่า $d_{\phi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ของทั้งสแกนเมื่อพิจารณาที่ $\text{Phi} (\phi) = 90^\circ$	76
ตารางที่ 4.3 แสดงการหาค่า $d_{\phi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กแผ่นเมื่อพิจารณาที่ $\text{Phi} (\phi) = 0^\circ$	86
ตารางที่ 4.4 แสดงการหาค่า $d_{\phi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กแผ่นเมื่อพิจารณาที่ $\text{Phi} (\phi) = 90^\circ$	89
ตารางที่ 4.5 แสดงการหาค่า $d_{\phi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กท่อกลมเมื่อพิจารณาที่ $\text{Phi} (\phi) = 0^\circ$	92
ตารางที่ 4.6 แสดงการหาค่า $d_{\phi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กท่อกลมเมื่อพิจารณาที่ $\text{Phi} (\phi) = 90^\circ$	95
ตารางที่ 4.7 แสดงการหาค่า $d_{\phi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กท่อสี่เหลี่ยมเมื่อพิจารณา ที่ $\text{Phi} (\phi) = 0^\circ$	98
ตารางที่ 4.8 แสดงการหาค่า $d_{\phi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กท่อสี่เหลี่ยมเมื่อพิจารณา ที่ $\text{Phi} (\phi) = 90^\circ$	101

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของระบบเครื่องมือวัดเอ็กซ์เรย์คิฟเฟรคโครมิเตอร์	5
รูปที่ 2.2 แสดงส่วนการกระตุ้น ส่วนคิฟเฟรคโครมิเตอร์ และส่วนการตรวจวัดรังสี	6
รูปที่ 2.3 X-Ray generator	7
รูปที่ 2.4 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากหลอดรังสีเอ็กซ์	8
รูปที่ 2.5 รูปแสดงส่วนคิฟเฟรคโครมิเตอร์	8
รูปที่ 2.6 แสดงหลักการของสมการแบรกก์ $2d \sin \theta = n \lambda$	9
รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของตัวตรวจตัวรังสี ชนิดProportional counter	9
รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของตัวตรวจตัวรังสี ชนิดScintillation counter	10
รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของตัวตรวจตัวรังสี ชนิดสารกึ่งตัวนำ	10
รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบการแจกแจงการวัดฟิสิกของเงิน (Ag) ระดับชั้นพลังงาน K_{α} และ K_{β} ของห้วัดรังสีทั้งสามชนิด	11
รูปที่ 2.11 แสดงความเค้นคงค้างลำดับที่ 1, 2 และ 3 ใน polycrystalline	13
รูปที่ 2.12 แสดงการ set-up และรูปแบบการเลี้ยวเบน	13
รูปที่ 2.13 ทิศทางขององค์ประกอบความเค้น ϵ_{ψ} และทิศทางขององค์ประกอบ ความเครียด σ_{ψ} ที่อยู่ในระบบโคออดิเนต P11, P22, P33	14
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบความเค้น กับ $\sin^2 \psi$	16
รูปที่ 2.15 แผนภูมิระหว่างเหล็ก-คาร์บอน	19
รูปที่ 2.16 เฟสไดอะแกรมระหว่างเหล็ก-คาร์บอน (ในช่วง 0 – 5.0% C)	19
รูปที่ 2.17 เฟสไดอะแกรมระหว่างเหล็ก-คาร์บอนอย่างง่าย แสดงลักษณะเฉพาะเฟส ที่จะปรากฏ ในเหล็กกล้าคาร์บอนเท่านั้น ได้แก่ เฟสสารละลายของเหลว ระหว่างเหล็กกับคาร์บอน เฟสเฟอร์ไรต์เซลล์ตา เฟสออสเตนไนต์ เฟสเฟอร์ไรต์ และเฟสซีเมนไตต์ หรือเหล็กคาไบด์	21
รูปที่ 2.17A แสดงการเปลี่ยนแปลงของเหล็กบริสุทธิ์ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17B แสดงปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิที่เกิดเฟอร์ไรต์เพียงเฟสเดียว ในเนื้อเหล็กกล้า	22
รูปที่ 2.17C แสดงปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิที่เกิดเฟสออสเทนไนต์เพียงเฟสเดียวในเนื้อ เหล็กกล้าคาร์บอน	23
รูปที่ 2.17D แสดงปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิที่เกิดเฟอร์ไรต์เคลตาเพียงเฟสเดียวในเนื้อ เหล็กกล้า	24
รูปที่ 2.18 แผนภาพสังเขปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้า คาร์บอนและปริมาณของโครงสร้างแต่ละแบบที่จะปรากฏในโครงสร้างจุลภาค	27
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะ โครงสร้างหน่วยเซลล์แบบ BCC	28
a) แสดงหน่วยเซลล์ในลักษณะของแข็งทรงกลม	
b) แสดงการเกิดหน่วยเซลล์	
c) แสดงการเรียงตัวของอะตอมจำนวนมาก	
รูปที่ 2.20 แสดงหน่วยเซลล์แบบ BCC	28
a) แสดงตำแหน่งอะตอม	
b) หน่วยเซลล์ในลักษณะทรงกลมของแข็ง	
c) แสดงการแยกส่วนในหน่วยเซลล์	
รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะ โครงสร้างหน่วยเซลล์แบบ FCC	29
a) แสดงหน่วยเซลล์ในลักษณะของแข็งทรงกลม	
b) แสดงการเกิดหน่วยเซลล์	
c) แสดงการเรียงตัวของอะตอมจำนวนมาก	
รูปที่ 2.22 แสดงหน่วยเซลล์แบบ BCC	29
a) ตำแหน่งอะตอม	
b) หน่วยเซลล์ในลักษณะทรงกลมของแข็ง	
c) แสดงการแยกส่วนในหน่วยเซลล์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ HCP	32
a) แสดงลักษณะรูปทรงของหน่วยเซลล์ a และ c แสดงความสั้นและความยาวของรูปผลึก	
b) แสดงการเรียงตัวของอะตอมจำนวนมาก	
รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะโครงสร้าง HCP	32
รูปที่ 2.25 แสดงหน่วยเซลล์แบบ HCP	33
a) ตำแหน่งอะตอม	
b) หน่วยเซลล์ในลักษณะ ทรงกลมของแข็ง	
c) แสดงการแยกส่วนในหน่วยเซลล์	
รูปที่ 2.26 แกน a1, a2, a3 และ c ของเซลล์หน่วย hcp	33
รูปที่ 2.27 แสดงเซลล์หน่วย hcp (ก) ระนาบฐาน (ข) ระนาบปริซึม	34
รูปที่ 2.28 เวกเตอร์ทิศทางที่สำคัญในเซลล์หน่วย hcp	34
รูปที่ 2.29 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาพของ (a) เฟิร์ลไลด์หยาบ (b) เฟิร์ลไลด์ละเอียด	37
รูปที่ 2.30 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในโลหะระหว่างการรีดเย็น	37
รูปที่ 2.31 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในโลหะระหว่างการรีดร้อน	38
รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของระบบ XRD Bruker AXS Model D8 Discover	39
รูปที่ 3.2 หลอดรังสีเอ็กซ์	40
รูปที่ 3.3 แสดงการเลี้ยวเบนตามกฎ Bragg's Law	41
รูปที่ 3.4 แสดงฐานวางชิ้นงาน	41
รูปที่ 3.5 แสดง Detector slit system ที่ติดอยู่กับ Detector	42
รูปที่ 3.6 แสดงช่องใส่ slit ของ Detector slit system	42
รูปที่ 3.7 Detector	43
รูปที่ 3.8 แท่งเหล็กปลายแหลม	43
รูปที่ 3.9 กล้องที่ใช้เป็นตัวช่วยขยายภาพ	44
รูปที่ 3.10 กล้องที่สามารถแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้	44

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 แสดงภาพรวมของการติดตั้งชุดอุปกรณ์เสริมที่ช่วยในการปรับแต่ง	45
รูปที่ 3.12 แสดงภาพรวมของการติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดความเค้น	45
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการเลื่อนของแกน Chi และ Phi	46
รูปที่ 3.14 แสดงกระบวนการขึ้นรูปของเหล็กท่อกลม	47
รูปที่ 3.15 แสดงการขึ้นรูปของเหล็กแผ่น โดยขึ้นรูปเป็นลักษณะท่อทรงกระบอกและสี่เหลี่ยม	47
รูปที่ 3.16 เหล็กแผ่นขนาด 5x5x3 mm	47
รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะของเหล็กท่อกลม (No.2) และ เหล็กท่อสี่เหลี่ยม (No.3)	48
รูปที่ 3.18 a) แสดงเลื่อยสายพาน b) ขณะเครื่องทำงาน c) ลักษณะของฟันเลื่อยที่ตัด	49
รูปที่ 3.19 แสดงการจัดวางตำแหน่งแท่งปลายแหลม ในการปรับ (Alignment) ตำแหน่ง	50
รูปที่ 3.20 a) แสดงลักษณะการเลื่อนของแกน X และ Y แสดงลักษณะการหมุนของแกน Phi	51
รูปที่ 3.21 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการปรับตำแหน่งฐานวางชิ้นงาน	52
รูปที่ 3.22 a) แสดงลักษณะการปรับตำแหน่งของแนวแกน Z b) รูปแสดงการเลื่อนของแกนPsi	53
รูปที่ 3.23 แสดงปลายแหลมของแท่งเหล็กที่แสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ ระหว่างการเลื่อนแกน Psi จะต้องอยู่ที่ตำแหน่งเดิม	53
รูปที่ 3.24 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการปรับตำแหน่งแกน Psi	54
รูปที่ 3.25 แสดงทังสเดน (free Stress) ที่ใช้ในการปรับเทียบ(Calibration)	55
รูปที่ 3.26 แสดงภาพพิกซ์ของเหล็กแผ่น	56
รูปที่ 3.27 แสดงภาพพิกซ์ของเหล็กท่อกลม	57
รูปที่ 3.28 แสดงภาพพิกซ์ของเหล็กท่อสี่เหลี่ยม	58
รูปที่ 3.29 แสดงขั้นตอนการกำหนดค่าแปรต่างๆ ในแกน Phi	60
รูปที่ 3.30 แสดงขั้นตอนในการกำหนดค่าแปรของแกน Psi	61
รูปที่ 3.31 แสดงลำดับขั้นตอนที่จะนำพาราเตอร์ที่กำหนดไว้มาใช้งาน	63

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.32 a) แสดงเมื่อเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เริ่มทำงาน	64
b) แสดงการทำงานของเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เมื่อมีการหมุนแกน chi	
รูปที่ 3.33 แสดงหน้าโปรแกรม Stress	64
รูปที่ 4.1 แสดงผลความเค้นของเหล็กแผ่น ที่มุม Phi = 0	70
รูปที่ 4.2 แสดงผลความเค้นของเหล็กแผ่น ที่มุม Phi = 90	71
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน Phi =0 ในมุม Psi ต่างๆของทั้งสแตน	72
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับ $\sin^2 \psi$ ของทั้งสแตนที่ Phi=0	74
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน Phi =90 ในมุม Psi ต่างๆของทั้งสแตน	75
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับ $\sin^2 \psi$ ของทั้งสแตนที่ Phi=90	77
รูปที่ 4.7 แสดงผลความเค้นของเหล็กแผ่นที่มุม Phi = 0	79
รูปที่ 4.8 แสดงผลความเค้นของเหล็กแผ่น ที่มุม Phi = 90	80
รูปที่ 4.9 แสดงผลความเค้นของเหล็กท่อกลม ที่มุม Phi = 0	81
รูปที่ 4.10 แสดงผลของเหล็กท่อสี่เหลี่ยม ที่มุม Phi = 90	82
รูปที่ 4.11 แสดงผลของเหล็กท่อสี่เหลี่ยม ที่มุม Phi = 0	83
รูปที่ 4.12 แสดงผลของเหล็กท่อสี่เหลี่ยม ที่มุม Phi = 90	84
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน Phi =0 ในมุม Psi ต่างๆของเหล็กแผ่น	85
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กแผ่น ที่ Phi=0	87
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน Phi =90 ในมุม Psi ต่างๆของเหล็กแผ่น	88
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กแผ่น ที่ Phi=90	90
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน Phi =0 ในมุม Psi ต่างๆของเหล็กท่อกลม	91
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กท่อกลมที่ Phi=0	93
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน Phi =90 ในมุม Psi ต่างๆของเหล็กท่อกลม	94
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กท่อกลมที่ Phi=90	96
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน Phi =0 ในมุม Psi ต่างๆของเหล็กท่อสี่เหลี่ยม	97

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของความเครียดกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กทอสี่เหลี่ยมที่ $\Phi=0$	99
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน $\Phi = 90$ ในมุม Ψ ต่างๆของเหล็กทอสี่เหลี่ยม	100
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ของความเครียดกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กทอสี่เหลี่ยมที่ $\Phi=90$	102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันวงการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรมของเหล็กกล้า (steel) เพื่อนำมาออกแบบเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตามความเหมาะสมของการใช้งาน เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ ยี่มของชิ้นส่วนรถยนต์ บานพับประตู ถังดับเพลิง ตู้อิเล็กทรอนิกส์ ตู้ควบคุมไฟฟ้า ลิฟท์และบันไดเลื่อน มอเตอร์ กุญแจ แม่พิมพ์ เป็นต้น สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำไปออกแบบเป็นผลิตภัณฑ์นั้นก็คือเหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยการรีดร้อน การรีดเย็น และการนำไปอบ เพื่อคลายความเครียดของเหล็กกล้าด้วยอุณหภูมิประมาณ $600 - 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นผ่านกระบวนการควบคุมคุณภาพซึ่งมีการทำความสะอาดยิ่งกว่ามีสิ่งเจือปนในเนื้อโลหะหรือไม่ ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการทั้งสองแล้วจะนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าต่อไป

เหล็กกล้าที่ผ่านกระบวนการต่าง ๆ แล้วนำไปขึ้นรูปตามความเหมาะสมจากนั้นจะต้องมีการวัดและวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กกล้า ซึ่งโดยทั่วไปที่นิยมทำกันก็คือการทดสอบทางด้านเชิงกลด้วยการวิเคราะห์หาค่าความแข็งแรง (strength) และความเหนียว (ductility) เพื่อจะไม่เกิดการแตกหักฉับพลันหรือแตกหักแบบเปราะขึ้นระหว่างการใช้งานด้วยวิธีการทดสอบทางเชิงกลได้แก่ ความแข็ง (hardness) กำลังดึง (tensile) ความโค้งงอของเหล็ก (yield) ค่าความสามารถของวัตถุที่สามารถยืดตัวได้สูง (elongation) อย่างไรก็ตามการทดสอบทางเชิงกลจะเป็นค่าความเค้นปกติที่เกิดจากเหล็กกล้ามีการเปลี่ยนแปลงขนาดแต่ไม่ได้เปลี่ยนรูปร่าง (dilatation) ถ้าพิจารณาขั้นตอนของกระบวนการแล้วนั้นจะเห็นว่านำไปอบเพื่อคลายความเครียดของเหล็กกล้าหรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการอบเพื่อคลายความเค้นคงค้างที่ตามองเห็น (Macroscopic residual stress) โดยในความเป็นจริงอาจจะมีค่าความเค้นคงค้างที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Microscopic residual stress) และไม่สามารถใช้การทดสอบทางด้านเชิงกลวัดและวิเคราะห์ได้ แต่สามารถใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์วัดและวิเคราะห์ค่าความเค้นคงค้างที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ได้

โครงการพิเศษนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาเครื่องมือที่เรียกว่า “ เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ” (X – Ray Diffractometer : XRD) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้เทคนิควิเคราะห์โครงสร้างของผลึกที่ไม่ทำลายสารตัวอย่างโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกที่มุมต่างๆ กัน ระบบเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวัดความเค้นคงค้าง

ได้อีกด้วย ซึ่งจะเป็ นวิธีการใหม่ในการวัดหาความเค้นคงค้าง ได้ถึงในระดับโครงผลึก ในการทดลองนี้ จะใช้สารตัวอย่างที่เป็นเหล็กกล้า เพราะเหล็กกล้านั้นนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมกัน อย่างกว้างขวาง ขณะที่โดยทั่วไปแล้วการหาขนาดของความเค้น จะทำการวัดโดยใช้การทดสอบทาง เมคคานิกส์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์มีความสามารถในการ ใช้งานได้หลากหลายไม่เฉพาะเพียงวัด โครงสร้างผลึกหรือองค์ประกอบของสารประกอบ เพียง ผู้ปฏิบัติงานทำความเข้าใจและสามารถประยุกต์ใช้เครื่องมือที่มีอยู่ก็จะทำให้เพิ่มความสามารถใน การใช้งานของเครื่องมือได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณสมบัติของสารตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบกับเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโต มิเตอร์
2. เพื่อศึกษาระบบพื้นฐานเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของ Bruker AXS Model D8 Discover
3. เพื่อศึกษาการติดตั้งชุดอุปกรณ์การวัดความเค้นในเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ของ Bruker AXS Model D8 Discover
4. เพื่อศึกษาการปรับแต่ง (Alignment) และการปรับเทียบมาตรฐาน (Calibration) ของ ระบบการวัดความเค้นของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของ Bruker AXS Model D8 Discover
5. เพื่อศึกษาการวัดและวิเคราะห์ความเค้นของเหล็กกล้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานการออกแบบของระบบเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโต มิเตอร์
2. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานการออกแบบของระบบเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโต มิเตอร์ของ Bruker AXS Model D8 Discover
3. ศึกษาหลักการระบบการวัดวิเคราะห์ความเค้นของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ของ Bruker AXS Model D8 Discover
4. ศึกษาการปรับแต่ง (Alignment) และการปรับเทียบมาตรฐาน (Calibration) ของระบบ การวัดความเค้นของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของ Bruker AXS Model D8 Discover

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างและคุณสมบัติต่างๆของสารตัวอย่างที่เป็นเหล็กชนิดต่างๆที่นำมาใช้ในการทดสอบวัดความเค้น
6. สรุปผลและวิเคราะห์ผลการศึกษา

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
มิถุนายน - กรกฎาคม พ.ศ. 2550	- ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานการออกแบบของระบบเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์ของ Bruker AXS Model D8 Discover - ศึกษาหลักการระบบการวัดวิเคราะห์ความเค้นของเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์ของ Bruker AXS Model D8 Discover (เครื่อง XRD ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
สิงหาคม - กันยายน พ.ศ. 2550	ศึกษาคุณสมบัติและการเตรียมสารตัวอย่างของสารตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบกับเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์
ตุลาคม - พฤศจิกายน พ.ศ.2550	นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์โดยใช้ระบบการวัดความเค้น
ธันวาคม- กุมภาพันธ์ พ.ศ.2550	วิเคราะห์หาความเค้นของสารตัวอย่างที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์ว่ามีความถูกต้องแม่นยำเหมาะสมกับการนำมาใช้งานจริงหรือไม่

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำความรู้ในหลักสูตรที่เรียนมาประยุกต์ใช้กับระบบการวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์
2. มีความรู้ความเข้าใจหลักการปฏิบัติการปรับแต่ง (Alignment) และการปรับเทียบมาตรฐาน (Calibration) ของระบบการวัดความเค้นของเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์ของ Bruker AXS Model D8 Discover
3. มีความรู้ความเข้าใจในการปฏิบัติงานของเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตมิเตอร์ของ Bruker AXS Model D8 Discover และการใช้โปรแกรมวิเคราะห์หาความเค้นของวัสดุ
4. มีความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีเกี่ยวกับคุณสมบัติของสารตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

เมื่อปี ค.ศ. 1895 W.C. Rontgen ได้ค้นพบรังสีเอ็กซ์ (X - Rays) ซึ่งเป็นแถบของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่ง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.1 - 100 อังสตรอม (Å) หรือ 0.01-10 nm แต่ที่ใช้วิเคราะห์ทางเคมีจะอยู่ในช่วง 0.07 - 0.2 nm รังสีเอ็กซ์จัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์หลาย ๆ อย่าง ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติและการเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์กับสสาร การเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอ็กซ์กับสสารนั้นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น เกิดการเปล่งแสงบางชนิด (emission) การดูดกลืน (absorption) การกระเจิง (scattering) หรือ การเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction) หรือเรียกว่า XRD เป็นวิธีการที่อาศัยหลักการของการระดมยิง (bombardment) รังสีเอ็กซ์ (primary x-rays) ที่ทราบค่าความยาวคลื่นไปตกกระทบสารตัวอย่างแล้วเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมต่างๆ กัน โดยมีตัวตรวจวัดรังสี (Detector) เป็นตัวรับสัญญาณรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนจากสารตัวอย่าง เนื่องจากวัสดุสารตัวอย่างมีส่วนผสมของสารประกอบ หรือโครงสร้างที่แตกต่างกันมีผลทำให้มุมที่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะมืองศาต่างกันไป สัญญาณที่ได้รับเมื่อนำไปประมวลผลข้อมูลแล้วนั้นจะสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของ ผลึก ของวัสดุสารตัวอย่างนั้นๆ ได้ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถ นำมาหาปริมาณคร่าวๆ ของปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึกและความเค้น ของสารประกอบในวัสดุสารตัวอย่างได้อีกด้วย

ในปี พ.ศ. 2455 นักวิทยาศาสตร์คือ วิลเลียม เฮนรี แบริก และ วิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบริก (William Henry Bragg และ William Lawrence Bragg) ได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ และกฎนี้จะเรียกว่ากฎของแบริก (Bragg's Law) ดังสมการ

$$2d_{(hkl)} \sin\theta = n\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ $d_{(hkl)}$ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกัน
 θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก

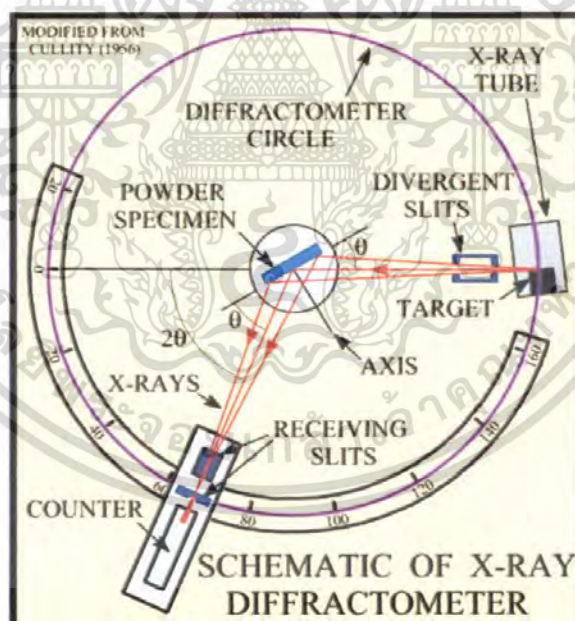
λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

n คือ ลำดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

2.1.1 หลักการทำงานทั่วไปของเครื่อง X-Ray Diffractometer

เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์วัสดุพื้นฐานแบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non - destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystal structure) การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์และความรู้เกี่ยวกับวิชาระบบโครงสร้างผลึก (crystallography) เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิตสำหรับตรวจสอบสมบัติของวัสดุดิบ และผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตขั้นตอนต่างๆ

ระบบเครื่องมือวัดของเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรมิเตอร์



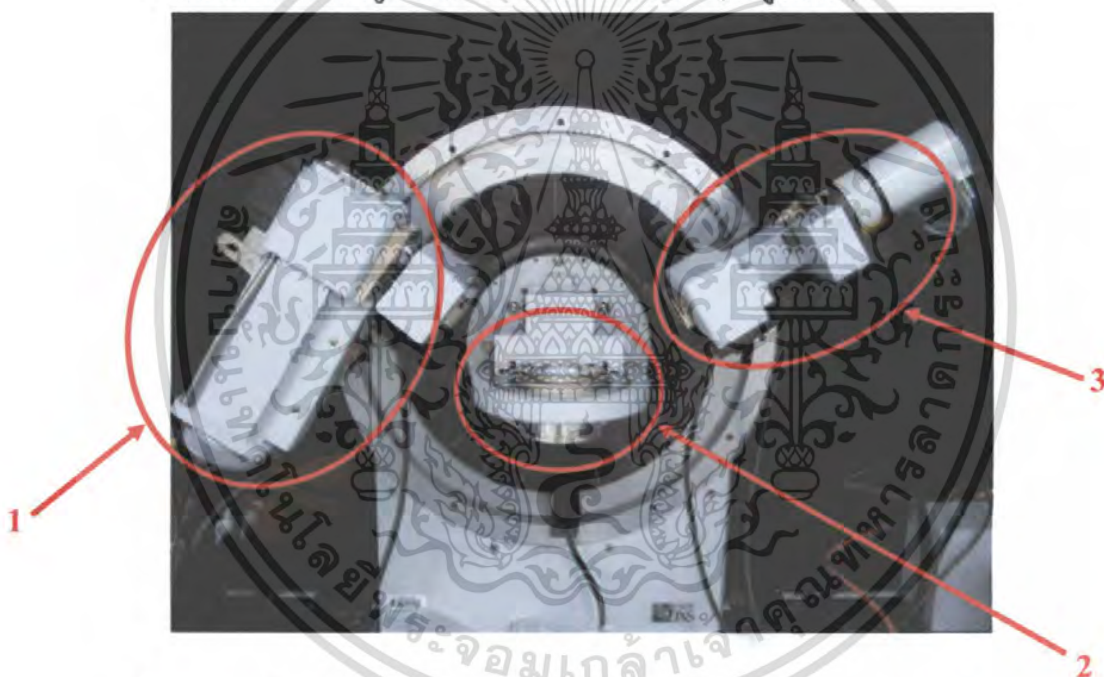
รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของระบบเครื่องมือวัดเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรมิเตอร์

รังสีเอ็กซ์ที่ออกมาจากหลอดรังสีเอ็กซ์ (x-ray tube) จะไปตกกระทบที่ผลึก (crystal) แล้วเลี้ยวเบน (diffraction) ออกมาจากผลึกของสารตัวอย่าง โดยมีความยาวคลื่นเท่ากับรังสีเอ็กซ์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบนจากสารตัวอย่างจะมีตัวตรวจวัด ตัวตรวจวัดรังสีจะทำหน้าที่สแกนไปรับความยาวคลื่นที่ตำแหน่งมุมต่างๆ โดยที่ตัวตรวจวัดรังสีจะดูดกลืนโฟตอนรังสีเอ็กซ์และจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณพัลส์ของกระแสไฟฟ้า ที่พีริแอมป์ลิไฟต์ และแอมป์ลิไฟต์ ซึ่งมีความเข้มของรังสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ และสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ สารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบของการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกันของสัญญาณพัลส์จะถูกส่งเข้าไปยังชุด pulse height selector เพื่อทำการเลือกความเข้มที่เหมาะสมส่งไปยัง ratemeter หรือ scaler ratemeter ซึ่งจะทำหน้าที่ในการสแกนและ scaler ทำหน้าที่วัดความเข้มแสงสำหรับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ

ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ (ดังรูปที่ 2.2)



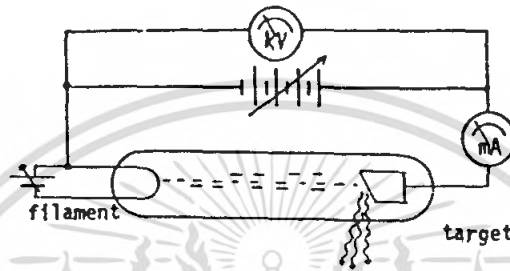
รูปที่ 2.2 แสดงส่วนการกระตุ้น ส่วนดิฟแฟรคโตมิเตอร์ และส่วนการตรวจวัดรังสี

ส่วนที่ 1. ส่วนการกระตุ้น (excitation) คือ X-Ray generator

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ โดยรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสภาวะระดับพลังงานของอะตอมจากระดับพลังงานสูงไปสู่ระดับพลังงานต่ำ รังสีเอ็กซ์นี้อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Isotope) หรือเกิดจากกลไกอิเล็กตรอนที่มนุษย์ผลิตขึ้น กล่าวคือเมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้น (Excite) จะทำให้บริเวณวงโคจรอิเล็กตรอนของอะตอมนอกนิวเคลียสได้รับผลการกระตุ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนจากสภาวะปกติ (ground state)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

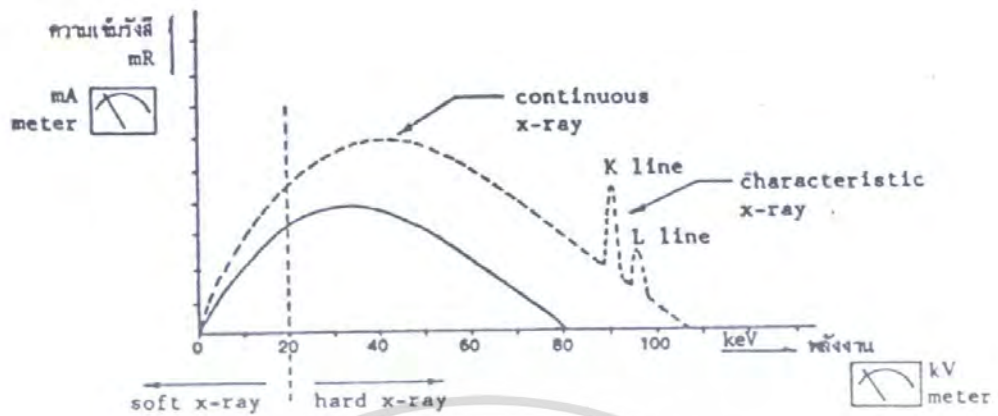
ไปสู่สถานะกระตุ้น (Excite state) และจะลดระดับพลังงานกลับเข้าสู่สภาวะปกติโดยมวลอะตอมไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่กลับเข้าสู่สภาวะปกตินั้นจะเกิดการแทนที่ในที่ว่างจากชั้นอิเล็กตรอนวงนอกซึ่งมีพลังงานสูงเข้าแทนที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้หลุดออกไปจากวงโคจรนั้น การแทนที่นี้ จะเกิดการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนออกมาจากอะตอมทุกครั้งที่ได้รับการกระตุ้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้เรียกว่า “รังสีเอ็กซ์”



รูปที่ 2.3 X-Ray generator

สำหรับรังสีเอ็กซ์ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามกระบวนการปลดปล่อยพลังงานส่วนที่กินจากอะตอมบริเวณชั้นโคจรอิเล็กตรอนคือ

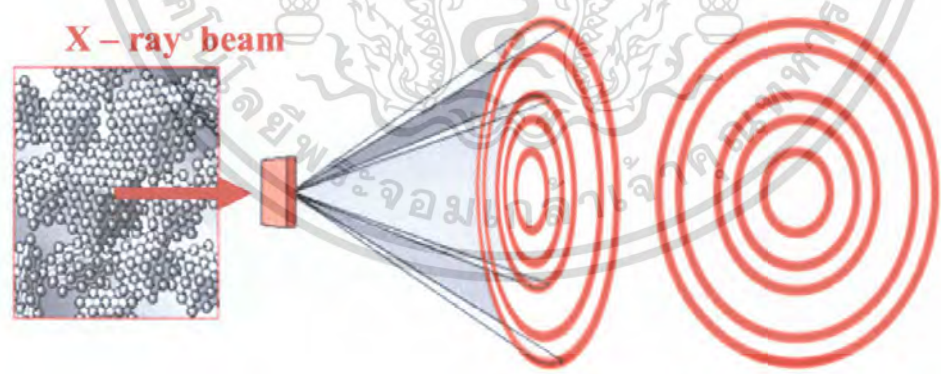
- ก. รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X - ray) มีลักษณะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่องกระจายจากค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุดบางครั้งเรียกว่า “โพลีโครมาติก” (Poly chromatic) หรือ รังสีขาว (White radiation) หรือ เบรมสตราลุงท์ (Bremsstrahlung)
- ข. รังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X - ray) มีลักษณะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานเดียว (monochromatic) เพราะเกิดจากการลดระดับพลังงานที่แน่นอนจากวงโคจรของอะตอม



รูปที่ 2.4 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากหลอดรังสีเอกซ์

ส่วนที่ 2. ส่วนการเลี้ยวเบน (diffraction)

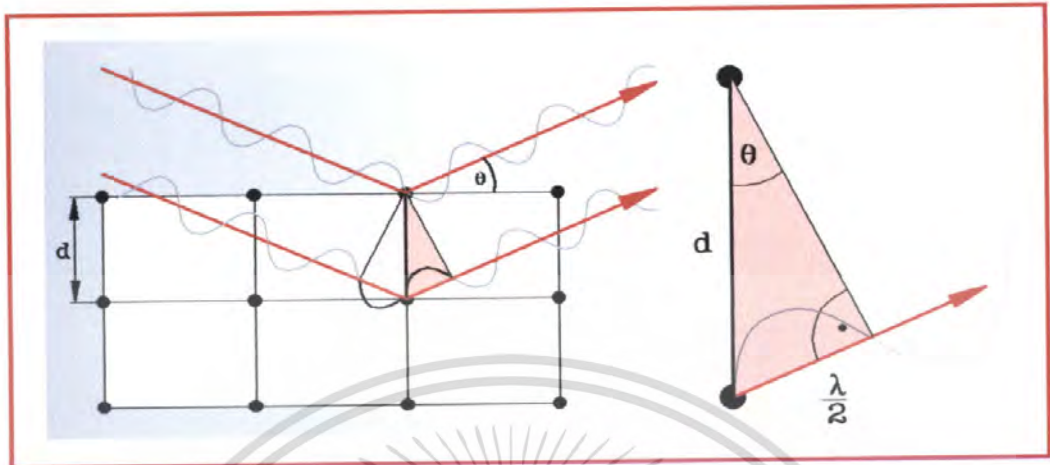
ส่วนการเลี้ยวเบนนี้ทำหน้าที่ในการบีบลำแสง ให้เป็นลำแสงขนานทั้งในกรณีตกกระทบเพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบนในสารตัวอย่าง และลำแสงที่สะท้อนออกมาจะส่งตรงไปยังตัวตรวจวัด ดังแสดงการทำงานของส่วนการเลี้ยวเบนแบบแบรกก์



รูปที่ 2.5 รูปแสดงส่วนดิฟแฟรคโตมิเตอร์

เป็นส่วนที่ออกแบบตามหลักการของสมการแบรกก์ดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



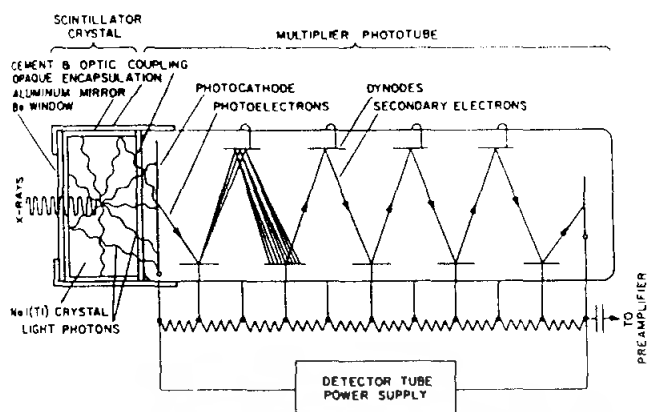
รูปที่ 2.6 แสดงหลักการของสมการแบรกก์ $2 d \sin \theta = n \lambda$

ส่วนที่ 3. ส่วนการตรวจวัด (detection) ก็คือ ตัวตรวจวัดรังสี (Detector)

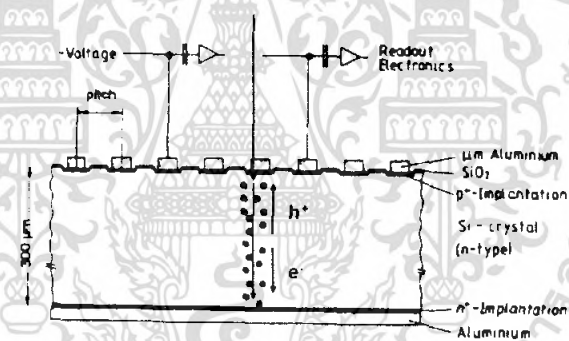


รูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของตัวตรวจตัวรังสี ชนิด Proportional counter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

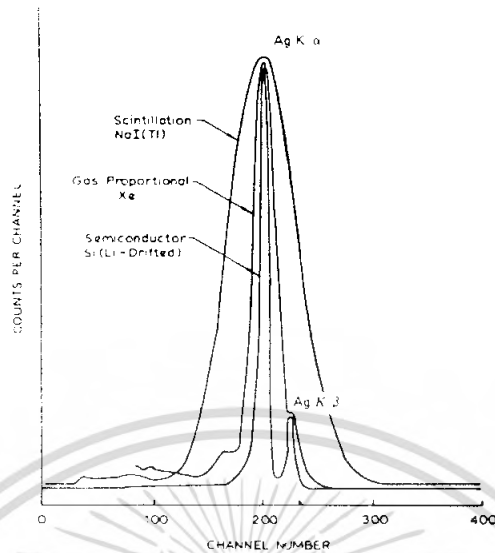


รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของตัวตรวจจับรังสี ชนิดScintillation counter



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของตัวตรวจจับรังสี ชนิดสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงการเปรียบเทียบการแจกแจงการวัดพีคของเงิน (Ag) ระดับชั้นพลังงาน K_{α} และ K_{β} ของหัววัดรังสีทั้งสามชนิด

2.2 การวัดความเค้นคงค้างด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.2.1 บทนำของความเค้นคงค้าง (Introduction to residual stress)

ความเค้นคือแรงที่กระทำต่อ 1 หน่วยพื้นที่ โดยที่ค่าบวกของความเค้นจะเป็นแรงดึง (Tension) ส่วนค่าลบจะเป็น แรงกด (Compression) ซึ่งการพิจารณาความเค้นภายในวัสดุจะแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ ความเค้นปกติ (normal stress) ความเค้นเฉือน (shear stress) และความเค้นหลัก (principal stress)

ความเค้นปกติ เป็นองค์ประกอบหนึ่งของความเค้นที่พิจารณาที่แรงกระทำตั้งฉากกับระนาบปกติ (normal of plane) ความเค้นปกติ มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่ได้เปลี่ยนรูปร่าง (dilatation) คำนี้นี้ตัวแรกจะแสดงถึงทิศทาง และ คำนี้นี้ตัวที่สองคือระนาบปกติ ที่ความเค้นมากระทำ ดังนั้น คำนี้นี้ของความเค้นปกติจะไม่มีทางมารวมกันได้

ความเค้นเฉือน เป็นองค์ประกอบหนึ่งของความเค้นเช่นกันแต่จะพิจารณาที่แรงกระทำขนานกับระนาบนั้นเลย ความเค้นเฉือน มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนรูปร่าง (distortion) คำนี้นี้ตัวแรกจะแสดงถึงทิศทาง และ คำนี้นี้ตัวที่สองคือระนาบปกติ ที่ความเค้นมากระทำ ดังนั้น คำนี้นี้ของความเค้นเฉือนสามารถรวมกันได้

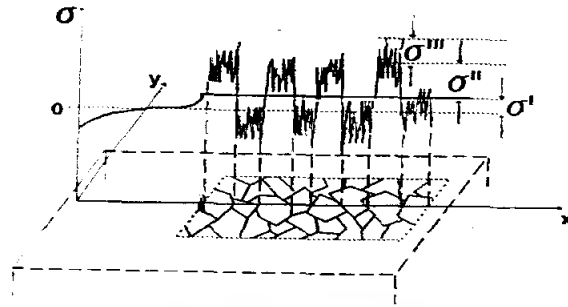
ความเค้นคงค้างเป็นความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนที่โดยขึ้นกับความสมดุลภายในวัสดุ ซึ่งจริงๆ แล้วความเค้นคงค้างเป็นผลที่ตามมาจากการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น (elastic deformation) และ/หรือการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (plastic deformation) ที่มีลักษณะไม่เหมือนกันแล้วยังกระจายตัวอยู่ทั่วปริมาตร โดยกำหนดจากความสัมพันธ์ของโครงสร้างของผลึกและแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วนคือความเค้นคงค้างที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Macroscopic residual stress) และความเค้นคงค้างที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Microscopic residual stress) การวัดและวิเคราะห์ความเค้นคงค้างของวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการวิเคราะห์ความเค้นด้วยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ อย่างไรก็ตามค่าของความเค้นคงค้างเป็นค่าคงที่ซึ่งสามารถแยกได้ 3 ลำดับ คือ ลำดับที่ 1 ลำดับที่ 2 และ ลำดับที่ 3

- ความเค้นคงค้างลำดับที่ 1 (First order residual stress) (σ^I) หรือเรียกว่า Macroscopic residual stress ซึ่งเป็นค่าที่ครอบคลุมอยู่เหนือเกรนจำนวนมากซึ่งมีความสมดุลกันทั้งโครงสร้างผลึก ความเค้นคงค้างลำดับที่ 1 (σ^I) สามารถได้ด้วยวิธี stress relieve

- ความเค้นคงค้างลำดับที่ 2 (Second order residual stress) (σ^{II}) เป็นค่าที่อยู่ภายใน 1 crystallite หรืออาจเป็น crystallite เล็กๆ จำนวนมากมารวมกันก็ได้ ความเค้นคงค้างลำดับที่ 2 (Second order residual stress) (σ^{II}) เกิดจากความแตกต่างของพฤติกรรม elastic และ plastic และการขยายตัวของความร้อน (Thermal expansion) ระหว่าง single crystallite ใน polycrystalline

- ความเค้นคงค้างลำดับที่ 3 (Third order residual stress) (σ^{III}) มีความแปรปรวนในระดับอะตอม ตัวอย่างการเกิดความเค้นคงค้างลำดับที่ 3 (Third order residual stress) (σ^{III}) คือ การแทนที่ หรือ การฝังตัวของอะตอม หรือ การ dislocation ใน crystallite

Macroscopic residual stress ที่วิเคราะห์ด้วยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ จะขึ้นกับการเลื่อนมุมของการเลี้ยวเบน ซึ่งสามารถใช้โปรแกรม ในการหาค่า Macroscopic residual stress ได้ ความเค้นคงค้างลำดับที่ 2 (Second order residual stress: σ^{II}) และความเค้นคงค้างลำดับที่ 3 (Third order residual stress: σ^{III}) จะเรียกอีกอย่างว่าเป็น microscopic residual stress ซึ่งสามารถใช้วิธีการรังสีเอ็กซ์หาค่าได้จากความกว้าง หรือ ลักษณะของเส้นการเลี้ยวเบน (diffraction line)



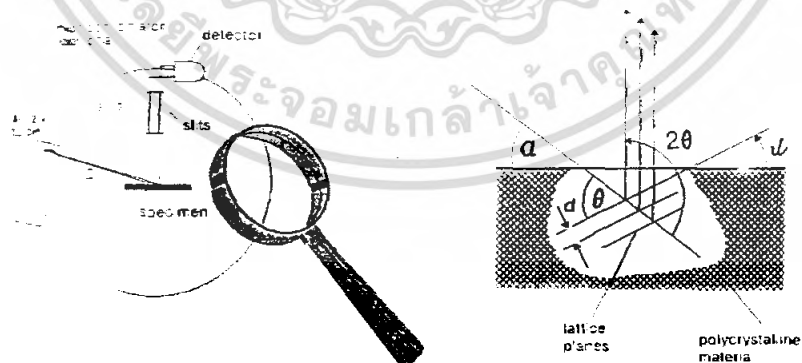
รูปที่ 2.11 แสดงความเค้นคงค้างลำดับที่ 1, 2 และ 3 ใน polycrystalline

2.2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการวิเคราะห์ความเค้นคงค้างด้วยรังสีเอ็กซ์

(Basic principle of X-ray residual stress Analysis)

การวิเคราะห์ความเค้นคงค้างด้วยรังสีเอ็กซ์ทำโดยการเลื่อนมุมแกนที่จะเกิดการเลี้ยวเบน ซึ่งการ set-up และรูปแบบการเลี้ยวเบนแสดงดังรูปที่ 2.12 กฎของแบรกก์ คือความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างระนาบของ crystallite ใน polycrystalline กับมุมที่เกิดการเลี้ยวเบน โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดียวและเขียนสมการความสัมพันธ์ตามกฎของแบรกก์ได้ดังนี้

$$2d_{\phi\psi} \cdot \sin \theta_{\phi\psi} = n \cdot \lambda \quad (2.2)$$



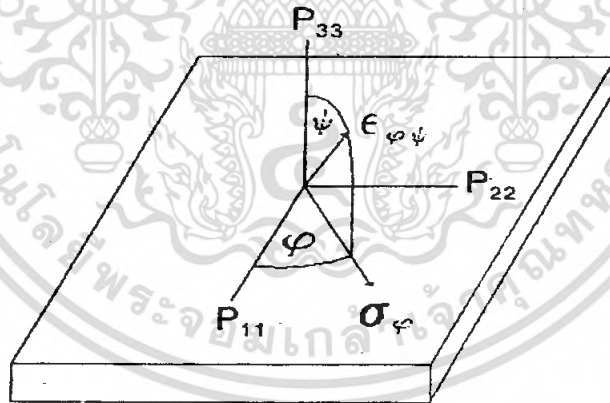
รูปที่ 2.12 แสดงการ set-up และรูปแบบการเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสารตัวอย่างที่จะทำการวัดมีขนาดใหญ่ เส้นการเลี้ยวเบนก็จะมิอยู่ที่ทุกๆ โครงผลึกใน polycrystalline ดังนั้นค่าระยะห่างที่ได้ก็จะเป็นการเฉลี่ยจากหลายๆผลึก ทิศทางการตรวจสอบ ระนาบแลตทิซจะขึ้นกับระบบ โคออดิเนทของสารตัวอย่าง (S_{11}, S_{22}, S_{33}) ซึ่งอธิบายได้จากมุม $\Phi(\varphi)$ และมุม $\Psi(\psi)$ ของระนาบแลตทิซปกติ (ดูรูป 2.12 , 2.13) ค่าความเค้นคงค้างจะเปลี่ยน ระยะห่างของแลตทิซเมื่อยังไม่มี ความเครียด (non-strained lattice) (d_0) ดังนั้นแลตทิซที่มีความเครียด(lattice strains) สามารถหาได้จากการเลื่อนมุมของเส้นการเลี้ยวเบน

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0} = -(\theta_{\varphi\psi} - \theta_0) \cot \theta_0 \quad (2.3)$$

เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับ การวัดและทำการวัดให้มีความไว น้อยที่สุดเพื่อที่จะได้ค่า d_0 ที่แม่นยำที่สุด การกระจายแลตทิซที่มีความเครียด (lattice strains distribution) ถูกบันทึกแทนการวัดครั้ง หนึ่งของ องค์ประกอบความเครียด (strain component) และในทางตรงกันข้ามวิธี strain gage ไม่สามารถหาค่าการกระจายตัวของความเครียด ได้จากความแตกต่างของมุม φ เพียงอย่างเดียวแต่ จะต้องสัมพันธ์กับมุม ψ ด้วย ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ทิศทางขององค์ประกอบความเครียด $\varepsilon_{\varphi\psi}$ และทิศทางขององค์ประกอบ ความเค้น σ_{φ} ที่อยู่ในระบบโคออดิเนต P_{11}, P_{22}, P_{33}

สำหรับ Macroscopic stress ที่มีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียวกัน (homogeneous macroscopic stress) ภายในปริมาตรที่มีการยึดหยุ่นแบบสมมาตร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียด ($\varepsilon_{\phi\psi}$) ที่ถูกวัดที่มุม ϕ และมุม ψ กับ องค์ประกอบความเค้น σ_{ij} (จะสัมพันธ์กับระบบโคออดิเนตของตัวอย่าง P_{ij}) หาได้จากทฤษฎี linear elasticity

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\phi\psi} = & \frac{1}{2}S_2[\sigma_{11}\cos^2\phi + \sigma_{12}\sin 2\phi + \sigma_{22}\sin^2\phi]\sin^2\phi \\ & + \frac{1}{2}S_2\sigma_{33}\cos^2\psi + S_1[\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}] \\ & + \frac{1}{2}S_2[\sigma_{13}\cos\phi + \sigma_{23}\sin\phi]\sin 2\psi\end{aligned}\quad (2.4)$$

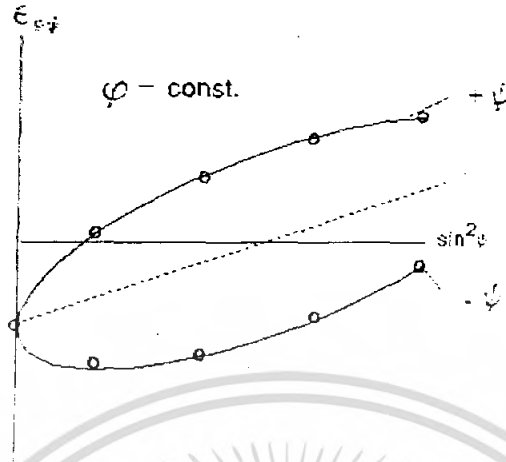
จากการวิเคราะห์ความเค้นด้วยรังสีเอ็กซ์สามารถกำหนดค่าองค์ประกอบความเครียด ได้โดยตรงจากโครงสร้างผลึก โดยการเลือกชนิดของระนาบ ค่าคงที่ความยืดหยุ่น (x-ray elastic constants) S_1 และ $\frac{1}{2}S_2$ ในสมการที่ 2.4 โดยใช้ สัญลักษณ์ของVoigt (Voigt's notation) มาอธิบาย

$$S_1 = -\frac{\nu}{E}, \quad \frac{1}{2}S_2 = \frac{\nu+1}{E}\quad (2.5)$$

เมื่อ ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) และ E คือ ค่าขึงคัมมอดูลัส (Young's modulus)

การหาค่าองค์ประกอบทั้งหมด σ_{ij} ของ เทนเซอร์ของความเค้น stress tensor จะสามารถหาได้จากองค์ประกอบความเครียดที่มีค่าน้อยที่สุด 6 ค่า ความเค้นหลัก (principal stress) และ ทิศทางของความเค้นหลัก (orientation of principal stress) จะขึ้นอยู่กับระบบโคออดิเนตซึ่งสามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนรูปของtensor (tensor transformation) ซึ่งการเพิ่มค่าขององค์ประกอบความเครียด นิยมใช้กันเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับการวัด ค่าstress tensor หาได้จากวิธีรีเกรสชัน (regression method) ปกติแล้วการแจกแจงความเครียดถูกพล็อตโดยการเปรียบเทียบของ $\sin^2\psi$ โดยให้มุม ϕ คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 การกระจายนี้จะพบว่าถูกแบ่งเป็น 2 ฟังโดยจะบอกถึงความแตกต่างได้โดยใช้เครื่องหมายหน้า ψ

จากสมการที่ 2.4 พบว่าองค์ประกอบความเค้นเฉือน (shear component) σ_{13} และ σ_{23} ขึ้นอยู่กับค่าของ $\sin 2\psi$ จึงอาจเรียกได้ว่า ψ - splitting และองค์ประกอบปกติ σ_{11}, σ_{22} และ องค์ประกอบความเค้นเฉือน (shear component) σ_{12} จะขึ้นกับ $\sin^2\psi$ ดังนั้นหาค่าได้จาก mean slope ของการกระจายเครื่องหมายของ mean slope (+,-) จะสัมพันธ์ไปถึงประเภทของความเค้นตึง (แรงดึง (tensile) หรือ แรงกด (compressive) ในทางตรงกันข้าม มุมถูกสัมพันธ์กับขนาด (magnitude) ในการคำนวณหาค่า องค์ประกอบความเค้น σ_{33} จะให้ $\sin^2\psi = 0$



รูปที่ 2.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบความเครียด กับ $\sin^2 \psi$

ต่อไปนี้จะเป็นการหาค่าองค์ประกอบความเค้นปกติ และองค์ประกอบความเค้น lattice strain ของการกระจายของ $-\sin^2 \psi$ ถูกวัดที่มุม ψ คงที่ซึ่งจะเป็นการกำหนดรูปของวงรี ให้คงที่โดยจะอธิบายได้ในสมการที่ 2.4 ค่าองค์ประกอบความเค้นที่เหมาะสมนี้จะถูกใช้เป็นพารามิเตอร์อิสระที่ให้ผลดีที่สุด ในการกำหนดค่าของเทนเซอร์ความเค้นที่สมบูรณ์ (complete stress tensor) จะได้การกระจายของ $-\sin^2 \psi$ มา 3 ค่า ซึ่งจะคำนวณได้จากมุม ψ ที่ต่างกันและในจากมุมที่ต่างกันนี้จะได้ค่า σ_{33} 3 ค่า ซึ่งจะต้องนำมาเฉลี่ยก่อนถึงจะนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป

ถ้าหาค่าเทนเซอร์ความเค้นที่สมบูรณ์ ได้ก็จะต้องหาค่าความเค้นหลักและทิศทางของความเค้นหลัก (orientation of principal stress) $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ และจะขึ้นอยู่กับ $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ ในการแก้สมการที่ 2.6 ค่าเทนเซอร์ (tensor) ของ σ_{ij} จะถูกเปลี่ยนแกนโคออดิเนตใหม่เพื่อที่จะได้ทิศทางโคซายน์ (direction cosine) อยู่ในแกนโคออดิเนตเดิม (original coordinate axes) และในการเปลี่ยนแปลงนี้ค่าเทนเซอร์ จะเปลี่ยนองค์ประกอบไปในแนวทแยง

$$[a, b, c] \cdot \begin{bmatrix} (\sigma_1 - \sigma_{11}) & -\sigma_{12} & -\sigma_{13} \\ -\sigma_{21} & (\sigma_2 - \sigma_{22}) & -\sigma_{23} \\ -\sigma_{31} & -\sigma_{32} & (\sigma_3 - \sigma_{33}) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.6)$$

ในทางปฏิบัติการวิเคราะห์ความเค้นโดยใช้รังสีเอ็กซ์ นิยมใช้สมการที่ 2.4 เข้ามาช่วยวิเคราะห์ เนื่องจากการซึมลึกเข้าไปของ soft x-ray ที่ถูกใช้ใน XRD (ในเหล็กกล้าประมาณ $5 \cdot 10^6$ เมตร)

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถานะของระนาบความเค้นใน single phase สามารถสมมุติฐานได้จากจุดคราก (yield) ที่ $\sigma_{33} = 0$ ดังนั้นค่า d_0 ที่แม่นยำนั้นไม่เคยถูกค้นพบมาก่อนแต่สามารถกำหนดได้จากกระบวนการข้างต้น นอกจากนี้องค์ประกอบความเค้นเฉือน (shear component) σ_{13} และ σ_{23} จะอยู่บนผิวหน้าเท่านั้น ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) โดย high tangential forces ดังนั้นการบั่นที่จะอยู่ในรูปของ

$$\sigma_{\varphi} = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi \quad (2.7)$$

สมการที่ 2.4 เป็นสมการพื้นฐานของวิธี $\sin^2 \psi$ ซึ่งจะหาค่าองค์ประกอบความเค้น และ ผลรวมของความเค้นหลัก ได้จากการกระจายของ $\sin^2 \psi$ ที่เป็นเชิงเส้นที่เหมาะสม

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1}{2} S_2 \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi + S_1 [\sigma_{11} + \sigma_{22}] \quad (2.8)$$



81604

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เหล็กกล้า (steel)

2.3.1 นิยามและการแบ่งประเภทพื้นฐานของเหล็กกล้า

เหล็กกล้า คือ เหล็กคุณภาพสูงที่ใช้งานในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป นิยามของเหล็กกล้า อาจะกำหนดง่าย ๆ ในขั้นพื้นฐานว่า หมายถึง เหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกิน 2.0% โดยน้ำหนัก (ต่อไปจะเขียนว่า 2.0°C) หากมีคาร์บอนผสมอยู่ในเหล็กกล้ามากกว่าปริมาณดังกล่าว จะเรียกว่าเหล็กหล่อ (Cast Iron)

ในเหล็กกล้าเอง ยังแบ่งได้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา (Plain Carbon Steels) ซึ่งจะเรียกสั้น ๆ ว่า เหล็กกล้าคาร์บอน-และเหล็กกล้าผสม (Alloy Steels) เหล็กกล้าสองกลุ่มนี้แบ่งกันที่ปริมาณธาตุผสมอื่นที่นอกเหนือจากคาร์บอน กล่าวคือ จากนิยามของ AISI (American Iron and Steel Institute) ได้กำหนดไว้ว่าเหล็กกล้าคาร์บอนคือ เหล็กกล้าที่มีธาตุผสมดังนี้

$$\text{Mn} \leq 1.65\% \quad , \quad \text{Si} \leq 0.60\% \quad , \quad \text{Cu} \leq 0.60\% \quad , \quad \text{P+S} \leq 0.05\%$$

นอกเหนือจากนี้ถือว่าเป็นเหล็กกล้าผสมทั้งหมด

ในการศึกษาคุณสมบัติ ลักษณะเฉพาะ และที่สำคัญคือโครงสร้างจุลภาค ของเหล็กกล้าคาร์บอนนั้น จะถือเสมือนว่าเป็นโลหะผสมระหว่างคาร์บอนเพียงสองธาตุเท่านั้นและอธิบายได้ด้วยสิ่งที่เรียกว่า แผนภูมิเฟส หรือเฟสไดอะแกรม (Phase Diagram) ระหว่างคาร์บอนกับเหล็กกล้า

ก. แผนภูมิเฟสระหว่างเหล็กคาร์บอน

คือแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กและอุณหภูมิ ว่า ณ ปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิที่สนใจ ในเนื้อเหล็กจะเกิด “ เฟส ” อะไรขึ้นบ้าง ซึ่งเฟสที่จะเกิดขึ้นระหว่างการผสมกันของธาตุเหล็กกับธาตุคาร์บอนที่สนใจอยู่สามลักษณะคือเหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ในปริมาณเท่าใดก็ตามหากอยู่ที่อุณหภูมิสูงพอเหล็กกับคาร์บอนจะละลายเข้าด้วยกันในสภาวะที่เป็นของเหลวเนื้อเดียวกล่าวได้ว่ามีเฟสเดียวคือสารละลายของเหลว (Liquid solution) ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่ในปริมาณต่ำจะอยู่ในสภาวะของแข็งโดยมีธาตุ-คาร์บอนละลายอยู่ในเนื้อเหล็กในสภาวะของแข็งนี้เรียกว่าสารละลายของแข็ง (Solid Solution) แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนที่สูงเกินกว่าจะกลายเป็นเนื้อเดียวกับเหล็กในสภาวะของแข็งได้ จะเกิดเฟสที่แตกต่างจากเนื้อเหล็ก คือ เฟสของเหล็กคาร์ไบด์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า เฟสซิเมนต์ไต์ (Cementite) และมีสูตรเคมีว่า Fe_3C

อย่างไรก็ตาม แผนภูมิเฟสระหว่างเหล็ก-คาร์บอนที่มีข้อมูลทันสมัยมากขึ้น ได้แก่แผนภูมิในรูป 2.16 ซึ่งถูกตีพิมพ์เผยแพร่ใน Metal Handbook ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 8 เมื่อปี 1973 ในแผนภูมินี้ได้แก่จุดสำคัญหลายจุด โดยเฉพาะจุดยูเทกเตอร์ ปรากฏอยู่ที่ส่วนผสม 0.77%C และอุณหภูมิ 727 °C และถัดจากนี้มา ยังมีแผนภูมิเฟสรูปอื่นๆที่มีการพิมพ์เผยแพร่ในเอกสารที่ใหม่มากขึ้น เช่น แผนภูมิเฟสที่ตีพิมพ์ใน Binary Alloy Phase Diagram, 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski (Editor – in – Chief), ASM International, Materials Park, OH., 1990 หรือรวมทั้งแผนภูมิเฟสที่ตีพิมพ์ใน Metal Handbook ฉบับปรับปรุงครั้งใหม่กว่าครั้งที่ 8 ซึ่งได้แก้ไขจุดที่สำคัญต่างๆ ในแผนภูมิเฟสเหล็กคาร์บอนนี้อีก แต่อย่างไรก็ตาม จะอ้างอิงแผนภูมิเฟสเหล็ก-คาร์บอนฉบับปี 1973 ในรูป 2.16 นี้เป็นหลัก

เฟสไออะแกรมเหล็ก-คาร์บอนในรูป 2.16 มีทั้งเส้นเต็มและเส้นประ ซึ่งเส้นเต็มแสดงถึงระบบของเหล็กกับเหล็กคาร์ไบด์ กล่าวคือ เมื่อเหล็กเปลี่ยนไปสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง คาร์บอนส่วนเกินที่ไม่สามารถละลายต่อไปในเนื้อเหล็ก (ของแข็ง) ได้ จะแยกตัวเป็นเหล็กคาร์ไบด์เท่านั้น ลักษณะนี้จะพบในเหล็กกล้า และในเหล็กหล่อขาว

ส่วนเส้นประในรูป*จะเป็นเส้นที่แสดงถึงระบบเหล็ก-คาร์บอน (แกรไฟต์) กล่าวคือในกรณีที่เกิดแกรไฟต์ในระบบ โดยที่เมื่อเหล็กหลอมเหลว (สารละลายของเหลวระหว่างเหล็กกับคาร์บอน) แข็งตัวเป็นของแข็ง คาร์บอนส่วนเกินที่ไม่สามารถละลายในเหล็กได้ จะแยกตัวออกมาเป็นแกรไฟต์ ในกรณีนี้จะต้องอ่านแผนภูมิจากเส้นประดังกล่าว อย่างไรก็ตาม แม้จะเป็นระบบเหล็ก-แกรไฟต์ก็ตาม เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ก็จะทำให้เกิดเฟสของเหล็กคาร์ไบด์-ซีเมนไตต์ได้อยู่ดี จากการแปลงเฟสของออสเทนไนต์ ดังจะได้กล่าวต่อไป

ถ้าพิจารณาเฉพาะเหล็กกล้าคาร์บอนเท่านั้นจะใช้แผนภูมิเฟสอย่างง่ายดังในรูป 2.17 ซึ่งแสดงเฉพาะ ส่วนของระบบเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ กล่าวคือเมื่อเหล็กบริสุทธิ์มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีการเปลี่ยน โครงสร้างภายใน 2 ครั้งก่อนที่จะหลอมเหลว เริ่มจากที่อุณหภูมิห้อง เหล็กอยู่ในรูปแบบที่เสถียรซึ่ง เรียกว่า เฟอร์ไรต์ (ferrite) หรือเหล็กแอลฟา (α) แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหล็กเฟอร์ไรต์จะ เปลี่ยนเป็นเหล็กออสเตนไนต์หรือเหล็กแกมมา (γ) ที่อุณหภูมิ 912 °C โครงสร้างออสเตนไนต์จะ ยังคงอยู่จนถึงอุณหภูมิ 1394 °C ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าว เหล็กจะเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างซึ่งเรียกว่าเฟอร์ไรต์เดลตา (δ ferrite) แล้วเหล็กเฟอร์ไรต์จะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1538 °C การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นตามแกนดิ่งที่ขอบซ้ายของแผนภูมิเฟสดังแสดงในรูป 2.17 และ 2.17A

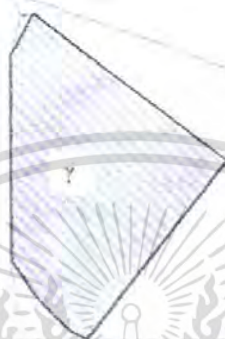
แกนนอนของแผนภูมิเฟสในรูปที่ 2.17 เป็นแกนที่บอกค่าปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ใน เหล็กนี้โดยในรูปที่ 2.17 แสดงถึงค่าส่วนผสมจนถึงปริมาตรคาร์บอน 6.7%C ที่จุดนี้เป็นส่วนผสม ของสารประกอบเหล็กคาร์ไบด์ หรือซีเมนไต์ (Fe_3C) และแสดงในแผนภูมิเป็นเส้นตรงใน แนวดิ่งในทางปฏิบัติ เหล็กกล้า (รวมถึงเหล็กหล่อด้วย) ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมมีคาร์บอนน้อยกว่า 6.7%C อยู่แล้ว ดังนั้นจึงสนใจศึกษาเฉพาะระบบของเหล็ก-คาร์บอน ที่มีบางส่วนเกิดเป็นเหล็กคาร์ไบด์นี้ขึ้นเท่านั้น เมื่อเหล็กบริสุทธิ์ถูกผสมด้วยธาตุคาร์บอนเข้าไปแล้วจะเกิดเป็นสารละลาย ของแข็งระหว่างเหล็กกับคาร์บอนได้ ทั้งในสภาวะที่เหล็กเป็นเฟอร์ไรต์เดลตา เฟอร์ไรต์และ ออสเตนไนต์

เหล็กเฟอร์ไรต์หรือเฟส α นั้นสามารถละลายคาร์บอนได้น้อย โดยขีดจำกัดการละลาย สูงสุดเท่ากับ 0.0218% ที่ 727 °C ขอบเขตของส่วนผสม (ปริมาณคาร์บอน) และอุณหภูมิที่จะเกิด เฟสของเฟอร์ไรต์เพียงเฟสเดียวในเหล็กกล้า แสดงด้วยพื้นที่แรเงาในรูป 2.17B

รูปที่ 2.17B แสดงปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิที่เกิดเฟอร์ไรต์เพียงเฟสเดียวในเนื้อเหล็กกล้า

ออสเตนไนต์หรือเฟส γ ของเหล็ก มีขีดจำกัดการละลายของคาร์บอนสูงสุดเท่ากับ 2.11%C ที่อุณหภูมิ 1148 °C และน้อยสุดที่อุณหภูมิต่ำอื่น ดังแสดงด้วยพื้นที่แรเงาในรูปที่ 2.17C (ดูรูป

ประกอบกับรูป 2.3) ความสามารถในการละลายนี้มากกว่าในของเฟอร์ไรต์เป็น 100 เท่า และพบว่า เหล็กแกมมาหรือออสเทนไนต์ซึ่งแต่เดิมหากเป็นเหล็กบริสุทธิ์ จะอยู่ในรูปของแกมมาได้เมื่อ อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 912 °C ขึ้นไป แต่เมื่อมีคาร์บอนผสมอยู่ เหล็กออสเทนไนต์อาจจะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำลงกว่า 912 °C ได้ แต่จะไม่เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 727 °C ดังแสดงในรูป 2.17 และ 2.17C



รูปที่ 2.17C แสดงปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิที่เกิดเฟสออสเทนไนต์เพียงเฟสเดียวในเนื้อเหล็กกล้าคาร์บอน

ประเด็นที่ออสเทนไนต์ละลายคาร์บอนได้สูงสุดถึง 2.11%C และอุณหภูมิ 727 °C เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่ออสเทนไนต์จะยังคงอยู่ได้ เหล่านี้มีความสำคัญต่อการเกิดโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นอย่างมาก เพราะในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะในกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ของเหล็กกล้า จะต้องเริ่มจากการอบ (เผา) ให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงจนกลายเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์นี้ก่อนแล้วจึงปล่อยให้เหล็กเย็นตัวลงมา เปลี่ยนโครงสร้างเป็นเหล็กเฟอร์ไรต์และเหล็กคาร์ไบด์ (ซีเมนไต์) ผสมกันต่อไป

เฟอร์ไรต์เดลตา (δ) มีลักษณะเหมือนเฟอร์ไรต์ (α) ยกเว้นว่าอุณหภูมิที่เสถียรต่างกัน กล่าวคือเฟอร์ไรต์เดลตาจะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำ และไม่มีมีความสำคัญทางการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค จึงจะไม่อธิบายถึงในที่นี้ พื้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสม (ปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้า) และอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดเฟอร์ไรต์เดลตาเพียงอย่างเดียวแสดงด้วยพื้นที่แรเงา ดังรูป 2.17D



รูปที่ 2.17D แสดงปริมาณคาร์บอนและอุณหภูมิที่เกิดเฟอไรต์เคลตาเพียงเฟสเดียวในเนื้อเหล็กกล้า

ซีเมนไตน์ (Fe_3C) เกิดขึ้นเมื่อปริมาณของคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กมากกว่าขีดจำกัดการละลายของเฟอไรต์ α ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $727^{\circ}C$ ดังแสดงในรูป 2.17 (พื้นที่ที่ระบุว่าเป็น $\alpha + Fe_3C$ ในรูปดังกล่าว) นอกจากนี้ Fe_3C ยังเกิดร่วมขึ้นกับ γ ในช่วงอุณหภูมิ 727 ถึง $1148^{\circ}C$ (พื้นที่ที่ระบุว่าเป็น $\gamma + Fe_3C$ ในรูป 2.17) ซีเมนไตน์มีลักษณะทางกลคือ ค่อนข้างแข็ง เพราะช่วยปรับปรุงความแข็งแรงของเหล็กได้

ในกรรมวิธีผลิตเหล็กกล้า เมื่อทิ้งให้เหล็กกล้าเย็นตัวลง ผ่านช่วงอุณหภูมิที่กลายเป็น ออสเทนไนต์ หรือแม้แต่ในกรรมวิธีทางความร้อน (การอบชุบความร้อน – Heat Treatment) ซึ่งเริ่มจากการให้ความร้อนแก่เหล็กจนมีอุณหภูมิสูง และกลายเป็นออสเทนไนต์ ระหว่างออสเทนไนต์เย็นตัวลงถึงอุณหภูมิต่ำ จะมีการเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิตายตัวอุณหภูมิหนึ่ง คือ $727^{\circ}C$ เรียกว่า อุณหภูมิยูเทคตอยด์ โดยเกิดกับออสเทนไนต์ที่มีส่วนผสม $0.77\%C$ เรียกว่าอุณหภูมิ ยูเทคตอยด์เกิดกับออสเทนไนต์ที่มีส่วนผสม $0.77\%C$ โดยน้ำหนัก การเปลี่ยนแปลงเฟสที่อุณหภูมิยูเทคตอยด์ หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยายูเทคตอยด์อธิบายได้ดังนี้



กล่าวคือ ระหว่างการเย็นตัวลง เฟสของแข็ง γ จะเปลี่ยนเป็นเหล็ก α และซีเมนไตน์สองเฟสพร้อมกันเมื่อส่องกล้องจุลทรรศน์ตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาของเหล็กกล้าที่ได้จากการแปลงเฟสแบบยูเทคตอยด์ของเหล็กออสเทนไนต์ จะพบว่าเนื้อเหล็กแยกเป็นสองส่วนคือ เฟอไรต์ และซีเมนไตน์อย่างชัดเจนดังจะกล่าวต่อไปนี้

ส่วนเมื่อเหล็กที่เดิมมีเนื้อเหล็กเป็นสองส่วน (เฟอไรต์และซีเมนไตน์) ณ อุณหภูมิห้อง เมื่อถูกให้ความร้อนจนอุณหภูมิสูงเพียงพอ เนื้อเหล็กจะกลายเป็นเนื้อเดียวกัน (หรือเฟสเดียวกัน) คือ เฟสออสเทนไนต์เท่านั้น ซึ่งก็เป็นผลจากการแปลงเฟสแบบยูเทคตอยด์เช่นกัน

โลหะในกลุ่มเหล็กมีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลักและมีคาร์บอนรวมทั้งธาตุอื่นๆ เป็นธาตุผสมในการแบ่งชนิดของโลหะในกลุ่มเหล็ก จะแบ่งเป็น 3 ชนิดโดยใช้ปริมาณคาร์บอนเป็นเกณฑ์ ได้แก่เหล็ก (iron) เหล็กกล้า (steel) และเหล็กหล่อ (cast iron)

1) เหล็ก (Iron) หรือเหล็กบริสุทธิ์ (เชิงวิศวกรรม) จะกำหนดให้มีปริมาณคาร์บอนได้สูงสุด 0.008% และจากแผนภูมิเฟสจะเห็นว่าที่อุณหภูมิห้องเหล็กชนิดนี้มีเพียงเฟสแอลฟา (α) เท่านั้น

2) เหล็กกล้า (Steel) ถ้าในเหล็กมีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 0.008% แต่น้อยกว่า 2.0% จะจัดเป็นเหล็กกล้า เหล็กกล้าเกือบทั้งหมดมีโครงสร้างที่อุณหภูมิห้องประกอบด้วยอแลฟาและเหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) เหล็กที่มีส่วนผสมช่วงนี้เมื่อเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องจะต้องผ่านพื้นที่ของเฟสแกมมา (γ) ในรูป 2.17 ก่อนที่จะเกิดเป็นโครงสร้างที่จะปรากฏ อุณหภูมิห้องจึงอธิบายในหัวข้อต่อไป แม้ว่าเหล็กกล้าจะมี %C มากที่สุดได้ถึง 2.0% แต่ในทางปฏิบัติปริมาณคาร์บอนที่เจอในเหล็กกล้ามักจะไม่เกิน 1.5 %

3) เหล็กหล่อ (Cast Iron) ซึ่งจะจัดเป็นโลหะในกลุ่มเหล็กจะมีคาร์บอน 2.0-6.7%³ อย่างไรก็ตามในทางการค้า เหล็กหล่อที่มีการใช้งานเชิงวิศวกรรมมักมีปริมาณคาร์บอนไม่เกิน 4.5%

ข. การแบ่งชนิดของเหล็กกล้าคาร์บอนตามโครงสร้างทางจุลภาค

โครงสร้างจุลภาคของโลหะคือลักษณะโครงสร้างหรือองค์ประกอบของเนื้อโลหะที่มีขนาดระดับ 1 mm หรือ เล็กกว่าจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เช่น กล้องจุลทรรศน์ในการตรวจสอบคุณลักษณะของโครงสร้างนั้นๆ โดยใช้กำลังขยายตั้งแต่ 25 เท่าขึ้นไป

คุณภาพของการผลิตโลหะนั้น เช่น ในแง่ของการทำความสะอาดนั้นจะควรมีสิ่งเจือปนเหลือคงอยู่ในเนื้อโลหะหรือไม่

กระบวนการผลิตโลหะนั้น เช่น โลหะที่ผ่านการรีดเย็น จะมีโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไป และเมื่อนำไปอบอ่อน ก็จะมีโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไปอีก ทั้งนี้ สมบัติเชิงกลของโลหะขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคด้วย กล่าวคือ โลหะที่มีส่วนผสมทางเคมีเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกันก็ย่อมมีสมบัติเชิงกลที่ต่างกันไปด้วย

เมื่อเข้าใจผลของปริมาณคาร์บอนที่มีโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนแล้ว ลำดับต่อไป จะทำความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอน ซึ่งส่งผลต่อการนำเหล็กนั้นไปใช้งานด้วย

เหล็กกล้าที่มีโครงสร้างเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ มีสมบัติพื้นฐานคือ เหนียว และนุ่ม กล่าวเป็นศัพท์ทางโลหะวิทยาว่า มีความเหนียว (Ductility) สูง และมีความแข็งแรง (Strength) ต่ำ ดังนั้นจึง

เหมาะสมสำหรับการนำไปขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีทางกล เช่น ดึงจากเส้นลวดเส้นใหญ่ให้ยืดออก กลายเป็นลวดเส้นเล็กลง (กรรมวิธีดึงลวด - Wire Drawing) หรือลากขึ้นรูปจากสภาวะแผ่นให้ กลายเป็นรูปทรงที่มีความลึก (กรรมวิธีขึ้นรูป - Deep Drawing) เป็นต้น

เหล็กกล้าที่มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์ จะมีสมบัติพื้นฐานคือ แข็งแรงและเหนียวพอควร กล่าวคือ มีความแข็งแรง (Strength) สูงและมีความเหนียว (Ductility) พอประมาณ ดังนั้นจึงเหมาะ สำหรับนำไปทำชิ้นงานรับแรง (การกรรม) เจริญ ซึ่งต้องการความปลอดภัย ต้องการให้มีความ เหนียวของชิ้นส่วน เพื่อรับประกันว่าจะไม่เกิดการแตกหักฉับพลันหรือแตกหักแบบเปราะขึ้น ระหว่างการใช้งาน เช่น เหล็กโครงสร้างเพื่อใช้ในการก่อสร้าง ฯลฯ

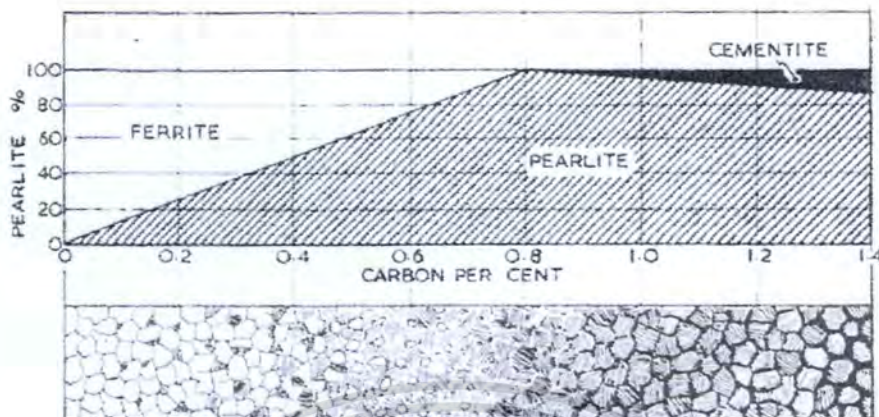
เหล็กกล้าที่มีเฟสซิเมนไตน้อยมาก จะมีสมบัติพื้นฐานคือ แข็ง แต่เปราะ กล่าวคือ มีความ แข็งแรง (Hardness) สูง แต่มีความเหนียว (Ductility) และความแข็งแรง (Toughness) ต่ำ เหมาะ สำหรับทำเครื่องมือตัด (Cutting Tools) หรือชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็ง เพื่อให้ทนต่อการสึก กร่อน

เหล็กกล้าคาร์บอนแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

- เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steels หรือ Mild Steels) มีโครงสร้างส่วนใหญ่เฟอร์ไรต์ ดังนั้นจะต้องมีปริมาณคาร์บอนที่ต่ำ เช่น ไม่เกิน 0.25%C เมื่อพิจารณาตามสมบัติเชิงกล พบว่าเน้นความเหนียว ขึ้นรูปง่าย

- เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steels) มีโครงสร้างเป็นเฟอร์ไรต์-เฟอร์ไรต์ (เฟอร์ไรต์ปฐมภูมิหรือโพรไรต์ชนิดโปรยูเทคตอยด์ผสมอยู่กับเฟอร์ไรต์ในปริมาณใกล้เคียง กัน) ปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 0.25%-0.45%C เมื่อพิจารณาตามสมบัติเชิงกลพบว่าเน้นที่ความ แข็งแรงไปพร้อมๆ กับความเหนียว

- เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steels) มีโครงสร้างในสภาพปกติเป็นเฟอร์ไรต์เป็นส่วน ใหญ่ โดยที่หากมีคาร์บอนมากกว่า 0.77%C หรือเป็นส่วนผสมไฮเปอร์ยูเทคตอยด์ โครงสร้าง จะมีโปรยูเทคตอยด์ซิเมนไตต์เกิดขึ้นด้วย ปริมาณคาร์บอนของเหล็กกล้ากลุ่มนี้อยู่ในช่วง 0.45-1.5%C เมื่อพิจารณาตามสมบัติเชิงกลพบว่าเน้นที่ความแข็งแรงและ/หรือความแข็งแรง โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ส่วนผสมคาร์บอนต่างๆจึงสรุปได้ดังในรูป 2.18 และมีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าคาร์บอนในแต่ละกลุ่ม (ที่แบ่งตามปริมาณคาร์บอน) ต่อไป



รูปที่ 2.18 แผนภาพสังเขปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนในเหล็กกล้าคาร์บอนและปริมาณของโครงสร้างแต่ละแบบที่จะปรากฏในโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ โปรเทคตอยด์เฟอร์ไรต์ (ในรูปเขียนสั้นๆว่า เฟอร์ไรต์) เฟอร์ไรต์ไลต์ และยูเทคตอยด์ซีเมนไตต์ (ในรูปเขียนย่อว่า ซีเมนไตน์) พร้อมวาดภาพแสดงถึงโครงสร้างดังกล่าวในรูป ส่วนที่แสดงด้วยสีขาว แสดงถึงเฟสเฟอร์ไรต์ชนิดโรยูเทคตอยด์ ส่วนที่เป็นพื้นที่แรเงาแสดงถึงโครงสร้างเฟอร์ไรต์ไลต์ และส่วนที่แสดงด้วยสีดำ แสดงถึงเฟสซีเมนไตต์ชนิดโปรยูเทคตอยด์

2.3.2 โครงสร้างผลึกของเหล็กกล้า

โลหะส่วนใหญ่ที่อุณหภูมิห้องและความดันปกติจะมีลักษณะโครงสร้างอยู่ในสเปซแลตทิซเพียง 2 แบบเท่านั้น คือ โครงสร้างผลึกเซลล์หน่วยลูกบาศก์ และโครงสร้างผลึกเซลล์หน่วยเป็นแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ดังจะกล่าวในรายละเอียดของแต่ละโครงสร้างได้ดังต่อไปนี้

2.3.2.1. โครงสร้างผลึกเซลล์หน่วยลูกบาศก์ (Cubic)

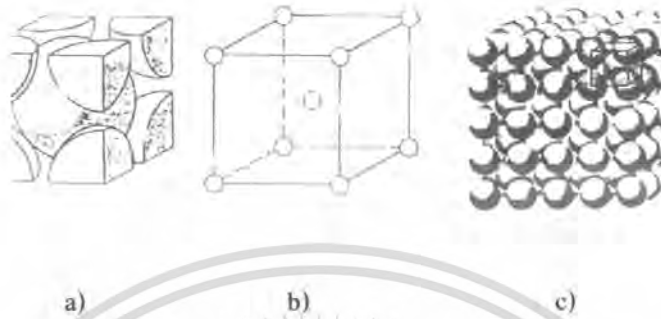
โครงสร้างผลึกเซลล์หน่วยลูกบาศก์จะแบ่งลักษณะโครงสร้างของหน่วยเซลล์ออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ Body Centered Centered Cubic (BCC) และ Face Centered Cubic (FCC)

ก. Body Centered Centered Cubic (BCC)

ลักษณะโครงสร้างของหน่วยเซลล์ ประกอบด้วยอะตอม 1 อะตอม อยู่ตรงศูนย์กลางของหน่วยเซลล์ และแต่ละอะตอมรวมกัน 8 อะตอม อยู่ตรงมุมของหน่วยเซลล์ในลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ทั้ง 8 อะตอมดังกล่าวจะถูกใช้ร่วมกับหน่วยเซลล์อื่น ๆ ในระบบโครงสร้างโดยรวม โครงสร้างแบบ BCC จะมีพันธะการเกิดแรง โดยรวมเท่ากับ 2 อะตอม

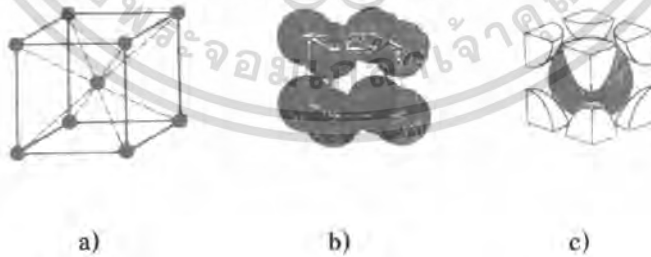


รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะ โครงสร้างหน่วยเซลล์แบบ BCC

- แสดงหน่วยเซลล์ในลักษณะของแข็งทรงกลม
- แสดงการเกิดหน่วยเซลล์
- แสดงการเรียงตัวของอะตอมจำนวนมาก

(William D.Callister Jr, หน้า 33)

โครงสร้าง Body Centered Cubic (BCC) พันธะการยึดเหนี่ยว : BCC = 2 อะตอม การคำนวณหาอะตอมใน 1 หน่วยเซลล์แบบ BCC จะเป็นดังนี้ ตัวอย่างชนิดของโลหะที่มีโครงสร้างแบบ BCC เช่น เหล็ก แอลฟา (α -Fe) ที่อุณหภูมิห้อง วานาเดียม (V) โครเมียม (Cr) โมลิบดีนัม (Mo) และทังสเตน (W)



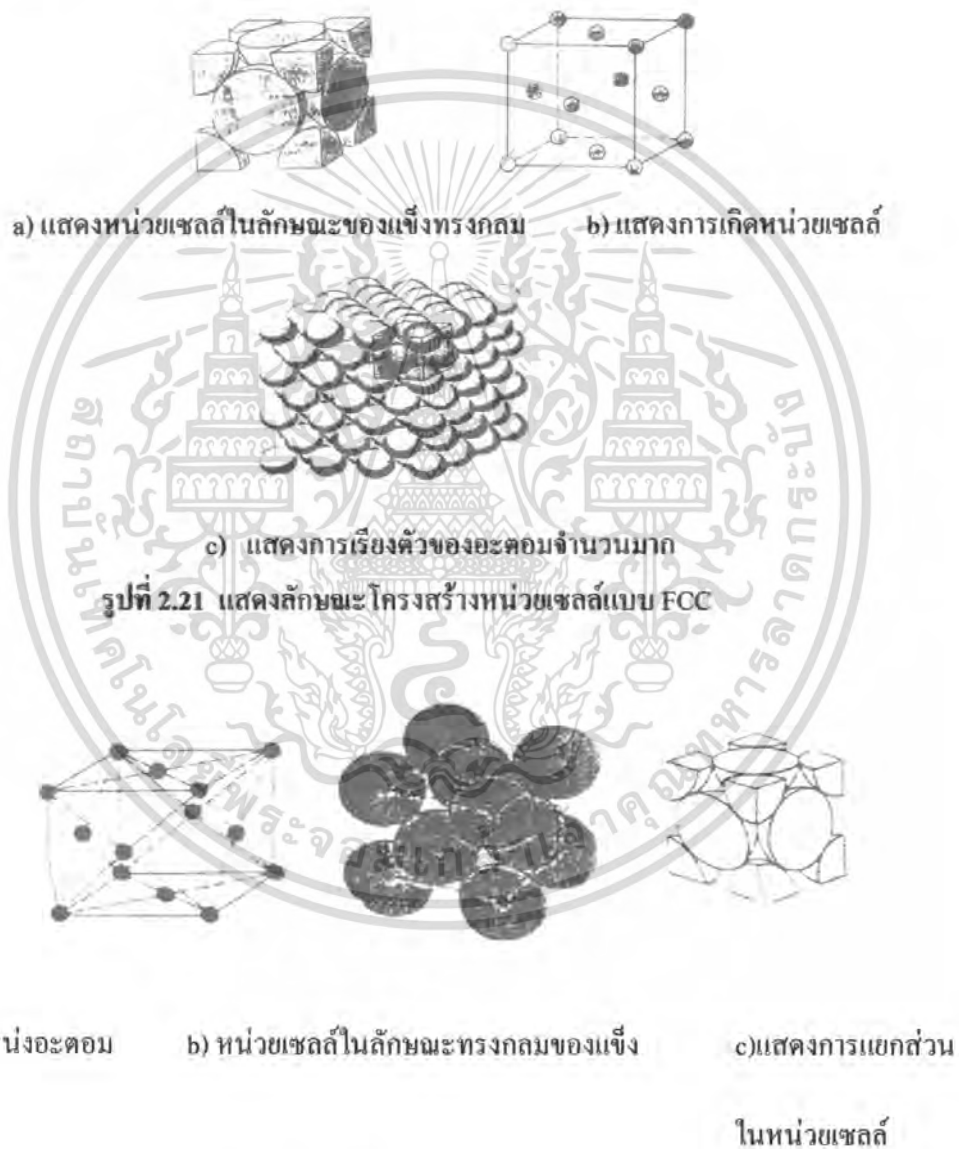
รูปที่ 2.20 แสดงหน่วยเซลล์แบบ BCC

- แสดงตำแหน่งอะตอม
- หน่วยเซลล์ในลักษณะทรงกลมของแข็ง
- แสดงการแยกส่วนในหน่วยเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. Face Centered Cubic (FCC)

ลักษณะโครงสร้างของหน่วยเซลล์จะประกอบด้วยอะตอม อยู่ตรงมุมของหน่วยเซลล์ในลักษณะที่ใช้ร่วมกับหน่วยเซลล์อื่น และอีก 6 อะตอม จะอยู่ที่กึ่งกลางของผิวทั้งหกด้านของหน่วยเซลล์ ในลักษณะที่จะร่วมใช้กับอีก 1 หน่วยเซลล์ที่วางอยู่ติดกัน ในโครงสร้างแบบ FCC จะมีพันธะการเกิดแรงโคจรรวมเท่ากับ 4



รูปที่ 2.22 แสดงหน่วยเซลล์แบบ FCC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้าง Face Centered Cubic (FCC) พันธะการยึดเหนี่ยว : FCC = 4 อะตอม

ตัวอย่างชนิดของโลหะที่มีโครงสร้างแบบ FCC เช่น เหล็กแกมมา (γ - Iron) ในช่วงอุณหภูมิ 912 – 1,394 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียม (Al) นิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) เงิน (Ag) ทองคำขาว (Pt) และทอง (Au)

ก. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเซลล์หน่วยลูกบาศก์

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก สามารถนำข้อมูลที่ได้จากลวดลายการเลี้ยวเบนมาวิเคราะห์ได้โดยตรง เมื่อพิจารณาโครงสร้างผลึกลูกบาศก์ จะพบว่าระยะระหว่างระนาบที่ขนานกันมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวแลตติซของเซลล์หน่วยลูกบาศก์นั้น ดังสมการ

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.9)$$

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.10)$$

$$\lambda = \frac{2a \sin \theta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.11)$$

สมการ (2.11) นี้ใช้สำหรับวิเคราะห์ค่าคงตัวแลตติซของผลึกลูกบาศก์ทั้งแบบ bcc และ fcc โดยที่ก่อนอื่นจำเป็นต้องรู้ว่ามีระนาบใดในผลึกที่เป็นระนาบแบรกก์บ้าง เช่น ถ้าเป็นลูกบาศก์เชิงเดี่ยว รังสีเอ็กซ์สามารถเลี้ยวเบนได้โดยระนาบบางระนาบทุกระนาบถ้าเป็น bcc การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นได้โดยระนาบเท่านั้น ซึ่งได้แก่ระนาบที่มีผลรวมของ h, k, l เป็นเลขคู่

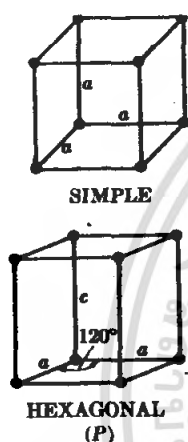
สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกว่าเป็นแบบใดที่ยู่ยากน้อยที่สุดคือการวิเคราะห์ว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบ bcc หรือ fcc สามารถวิเคราะห์ได้โดยการยกกำลังสองสมการ (2.11) แล้วจัดรูปสมการใหม่ได้

$$\sin^2 \theta = \frac{2(h^2 + k^2 + l^2)}{4a^2} \quad (2.12)$$

ตารางที่ 2.1 แสดงหลักการหาระนาบแบรกก์ในผลึกลูกบาศก์

ผลึกลูกบาศก์	เกิดการเลี้ยวเบน	ไม่เกิดการเลี้ยวเบน
bcc	$h + k + l = \text{เลขคู่}$	$h + k + l = \text{เลขคี่}$
fcc	(h,k,l) เป็นเลขคู่หมดหรือเป็นเลขคี่หมด	(h,k,l) ไม่เป็นเลขคู่หมดหรือไม่เป็นเลขคี่หมด

เช่น ระบบ cubic



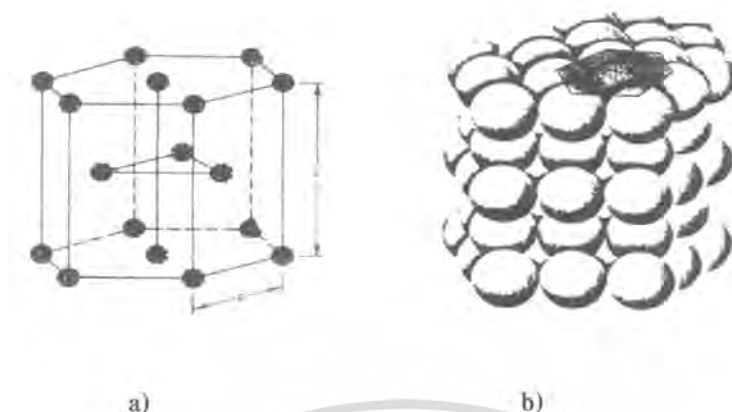
$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{k^2 + hk + l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2}$$

2.3.2.2 Hexagonal Close – Packed (HCP หรือ CPH)

ถึงแม้โลหะโดยทั่วไปจะมีระบบโครงสร้างหน่วยเซลล์เป็นแบบ Cubic ก็ตาม แต่ยังมีโลหะที่ใช้งานโดยทั่วไปที่มีโครงสร้างผลึกในลักษณะที่รวมหน่วยเซลล์เป็นแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal) ลักษณะโครงสร้างผลึกในรูปแบบของ HCP ระบายด้านบนและด้านล่างจะประกอบด้วยอะตอมตรงมุมเหลี่ยมด้านละ 6 อะตอม รวม 12 อะตอม อีก 2 อะตอม จะอยู่ที่กึ่งกลางของระนาบด้านบนและด้านล่าง และจะมีอีก 3 อะตอมอยู่ระหว่างระนาบด้านบนและด้านล่างในลักษณะระบาย 3 เหลี่ยม ในโครงสร้างผลึกแบบ HCP จะมีพันธะการเกิดแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 6 อะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบ HCP

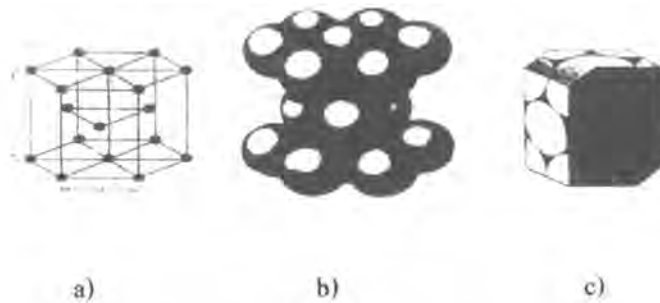
- a) แสดงลักษณะรูปทรงของหน่วยเซลล์ a และ c แสดงความสั้นและความยาวของรูปผลึก
b) แสดงการเรียงตัวของอะตอมจำนวนมาก



รูปที่ 2.24 แสดงลักษณะ โครงสร้าง HCP

โครงสร้าง Hexagonal Close – Packed (HCP) พันธะการยึดเหนี่ยว HPC = 6 อะตอมการคำนวณหาพลังอะตอม (Atomic Force) ในระบบผลึกแบบ HCP จะเป็นดังนี้ ระบายบนและระบายล่าง จะมีระนาบละ 6 อะตอม ในสภาพที่ต้องใช้ร่วมกับผลึกอื่น ๆ ระบายละ 6 ผลึก ตัวอย่างชนิดโลหะที่มีโครงสร้างผลึกแบบ HCP เช่น เบอริเลียม (Be) แมกนีเซียม (Mg) ไททานเนียม (Ti) สังกะสี (Zn) และเซอร์โคเนียม (Zr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

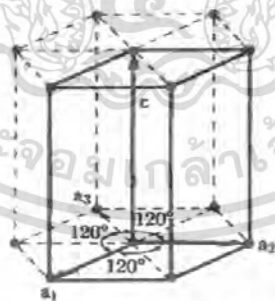


รูปที่ 2.25 แสดงหน่วยเซลล์แบบ HCP

- ตำแหน่งอะตอม
- หน่วยเซลล์ในลักษณะ ทรงกลมของแข็ง
- แสดงการแยกส่วนในหน่วยเซลล์

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเซลล์เฮกซะโกนอล

คระรชนที่ใ้ช้เรียกชื่อระรนาบต้งๆ ในเซลล์หน่วยเฮกซะโกนอล (hcp) คือคระรชนมิลเลอร์-บราวเวส์ (Miller-Bravais indices) จากรูปที่ 2.26 เซลล์หน่วย hcp ประกอบด้วยแกน 4 แกนคือ แกน a_1 , a_2 , a_3 และ c ถ้าให้ h , k และ l เป็นค่าที่ได้จากส่วนกลับของระยะที่ระรนาบที่กำลังพิจารณาตัดแกน a_1 , a_2 , a_3 และ c ตามลำดับ (hkl) ก็คือคระรชนมิลเลอร์-บราวเวส์ของระรนาบนั้น



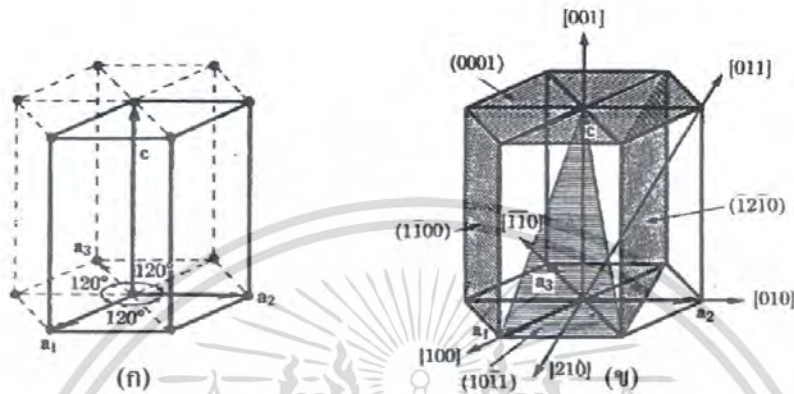
รูปที่ 2.26 แกน a_1 , a_2 , a_3 และ c ของเซลล์หน่วย hcp

โครงสร้างของเซลล์หน่วย hcp ประกอบด้วยระรนาบ 2 แบบ คือ

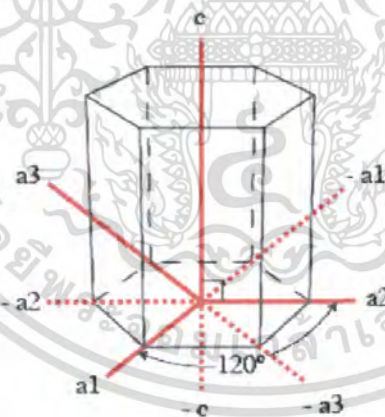
- ระรนาบพื้นฐาน (basal plane) มี 2 ระรนาบ คือ ฐานบนและระรนาบฐานล่างแกน a_1 , a_2 , a_3 เป็นแกนที่อยู่ในระรนาบฐานทำมุม 120° ซึ่งกันและกัน ระยะตัดแกน $a_1 = a_2 = a_3 = \infty$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนที่ 4 คือแกน c เป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบฐานทั้งสอง ซึ่งตัดแกน c ห่างกันเป็นระยะ 1 หน่วย ส่วนกลับของระยะตัดแกนทั้งสอง จึงเท่ากับ 0,0,1 ตามลำดับ ดังนั้น ครรชนนิมิตเลอร์ - บราวส์ของระนาบฐานก็คือ (0001)



รูปที่ 2.27 แสดงเซลล์หน่วย hcp (ก) ระนาบฐาน (ข) ระนาบปริซึม



รูปที่ 2.28 เวกเตอร์ทิศทางที่สำคัญในเซลล์หน่วย hcp

2) ระนาบปริซึม (prism plane) มี 6 ระนาบหรือหน้า แต่ละหน้ามีระยะตัดแกนคนละชุด ตัวอย่างเช่น หน้า ABCD มี $a_1 = +1$ $a_2 = \infty$ $a_3 = -1$ และ $c = \infty$ ครรชนนิมิตเลอร์ - บราวส์ของระนาบปริซึมหน้านี้จึงเป็น (1010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกันระนาบปริซึมหน้า AB EF ที่มีครรชนี (1100) หน้า DC GF มีครรชนี (0110) ระนาบปริซึมทุกระนาบในเซลล์หน่วยสามารถแทนได้ด้วยครรชนีเดียวกันคือ {1010} ระยะห่างแต่ละระนาบเรียกว่า interplane spacing หรือ lattice distance (d) จะสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left[k^2 + hk + \frac{l^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.13)$$

ในโครงสร้างแบบ BCC FCC และ HCP เหล่านี้ อาจมีการเปลี่ยนแปลงตัวเองได้ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง การที่โลหะหนึ่งโลหะใดรวมกับโลหะอื่นนั้นย่อมเป็นไปได้ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอมและอุณหภูมิเป็นสำคัญ ถ้าอะตอมมีขนาดใกล้เคียงกันและมีโครงสร้างผลึกแบบเดียวกันอาจรวมกันได้ โลหะผสมที่เกิดขึ้นใหม่อาจมีโครงสร้างผลึกเหมือนเดิม หรือผิดไปจากเดิมก็ได้ แต่ถ้าอะตอมมีขนาดแตกต่างกันมากและมีโครงสร้างผลึกเป็นคนละแบบ เป็นการยากที่รวมกันได้

โลหะที่มีโครงสร้างแบบ (BCC Body Centered Cubic) เป็นโลหะที่ก้ำกั้ววัสดุค่อนข้างแข็งแรง มีค่าดัชนีความแข็งสูง สามารถรับแรงดึงได้ดี แต่จะไม่สามารถตีเป็นแผ่นหรือดึงเป็นเส้นไม่ได้ เช่น โชนิคัม โครเมียม วานาเดียม และเหล็กแอลฟา เป็นต้น

โลหะที่มีโครงสร้างแบบ (FCC Face Centered Cubic) เป็นโลหะที่มีเนื้อค่อนข้างอ่อนและมีความเหนียวมากกว่าแบบ BCC สามารถตีเป็นแผ่นหรือยึดเป็นเส้นได้ง่ายกว่า ตัวอย่างโลหะ เช่น อะลูมิเนียม นิกเกิล ทองแดง ทอง ตะกั่ว และเหล็กแกมมา

ส่วนโลหะที่มีโครงสร้างแบบ HCP (Hexagonal Close – Packed) เมื่อนำมาตีเป็นแผ่นหรือยึดเป็นเส้นจะมีความแข็งมากขึ้น เช่น สังกะสี แคดเมียม แมกนีเซียม เบริลเลียม เป็นต้น

2.3.3 ผลของกรรมวิธีต่อโครงสร้างจุลภาค

ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะผลของกรรมวิธีการผลิตต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำถึงปานกลางเท่านั้น กรรมวิธีการผลิตที่กล่าวถึงนี้ได้แก่กระบวนการขึ้นรูปทางกล (Mechanical Working / Forming) ซึ่งสำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่มักจะผลิตเป็นเหล็กแผ่นรวมทั้งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่ผลิตในรูปของเหล็กเส้น (Steel Rod , Steel Bar) หรือเหล็กรูปพรรณต่างๆ มีกรรมวิธีการขึ้นรูปทางกลอยู่สองรูปแบบ คือ การขึ้นรูปร้อน และการขึ้นรูปเย็น

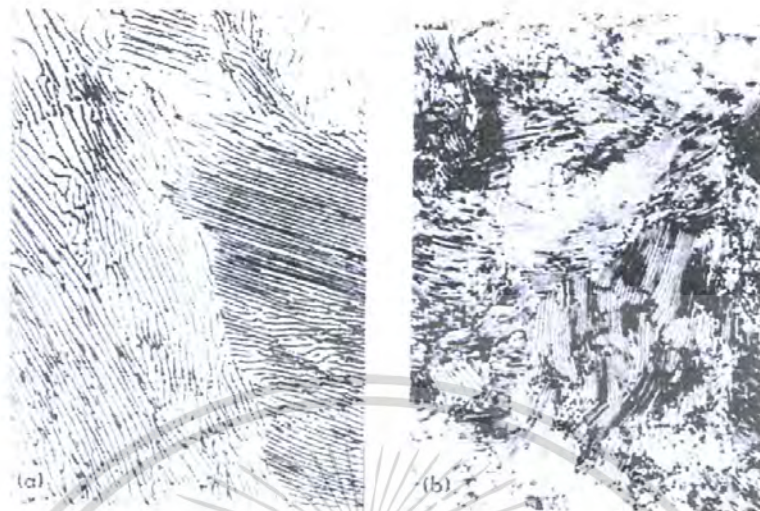
ก. การขึ้นรูปร้อน

เป็นกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) หรือที่เรียกว่า “ การอบชุบความร้อน “ สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอนนั้น ได้แก่การอบให้เหล็กกล้ามีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์ แล้วทิ้งให้

เย็นตัวลงมาใหม่ โดยควบคุมให้มีอัตราการเย็นตัวที่เหมาะสม ส่งผลให้ได้โครงสร้างจุลภาคใหม่ที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น เมื่อเหล็กกล้าในสภาพออสเทนไนต์เย็นตัวลง

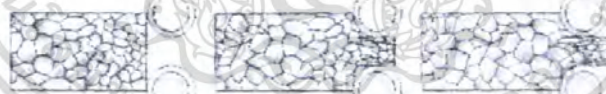
- อัตราการเย็นตัวที่ช้ามาก เช่น เย็นในเตาอบ จะมีโครงสร้างเฟอไรต์ลัดด์หยาบ หรือ อาจจะเป็นเพียงโครงสร้างซิเมนไตต์กระจายบนเฟอร์ไรต์ เรียกว่า การอบนึ่งเต็มที่ (Full Annealing)
- อัตราการเย็นตัวที่ช้า เช่น ในอากาศ ได้โครงสร้างเฟอไรต์ลัดด์ละเอียด เรียกว่า การอบปกติ (Normalizing) โดยทั่วไป เมื่อก้าวถึงสมบัติทางกลของเหล็กกล้าการอบในสภาพ “ ปกติ “ จะอ้างอิงกับสภาพการอบปกตินี้มา
- อัตราการเย็นตัวเร็วปานกลาง เช่น เย็นในน้ำมัน ได้โครงสร้างเบนไนต์ (Bainite) ซึ่งเป็นการชุบแข็งที่ไม่สมบูรณ์
- อัตราการเย็นตัวเร็วมาก (เช่น เย็นในน้ำ) เมื่ออัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้าที่มีโครงสร้างเป็นออสเทนไนต์สูงกว่าอัตราการเย็นตัววิกฤต จะทำให้เหล็กออสเทนไนต์เปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกที่เรียกว่า “ มาเคนไซต์ “ (Martensite) ซึ่งมีความแข็งแรงสูง แต่เปราะ กรรมวิธีที่ทำให้เหล็กกลายเป็นเหล็กมาร์เทนไซต์ เรียกว่า การชุบแข็งเหล็กกล้า (Hardening of Steels)

เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเฟอไรต์ลัดด์หยาบและเฟอไรต์ลัดด์ละเอียด เช่นในรูป 2.29 เฟอไรต์ลัดด์หยาบคือเฟอไรต์ลัดด์ที่มีความหนาของแถบเฟอร์ไรต์และแถบซิเมนไตต์มาก ส่วนเฟอไรต์ลัดด์ละเอียด ลักษณะโครงสร้างจะเห็นว่าเป็นแถบบางๆ ของเฟอร์ไรต์กับซิเมนไตต์สลับกัน และในหลายกรณีต้องใช้กำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์ที่สูงพอสมควร เช่น ตั้งแต่ 1000 เท่าขึ้นไป จึงจะสามารถมองได้ว่า บริเวณดังกล่าวเป็นเฟอไรต์ลัดด์ละเอียด หากใช้กำลังขยายต่ำเกินไป ซึ่งส่งผลให้กำลังแยกในความคมชัดของภาพ (Resolution) ไม่เพียงพอ จะมองเห็นบริเวณของเฟอไรต์ลัดด์ละเอียดเป็นบริเวณสีค้ำเพียงสีเดียว และเข้าใจได้ว่าเป็นเฟสใหม่ที่ต่างจากเฟสปฐมภูมิในเหล็กกล้าชิ้นๆ



รูปที่ 2.29 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของ (a) เฟอร์ไรต์ไฮยาบ ซึ่งได้จากการแปลงเฟสแบบยูเทกตอยด์ที่อุณหภูมิ 704°C (1300°F) และ (b) เฟอร์ไรต์ละเอียด ซึ่งได้จากการแปลงเฟสแบบยูเทกตอยด์ที่อุณหภูมิ 663°C (1225°F) ทั้งสองรูปถ่ายที่กำลังขยายเดียวกัน คือ 1500 เท่า

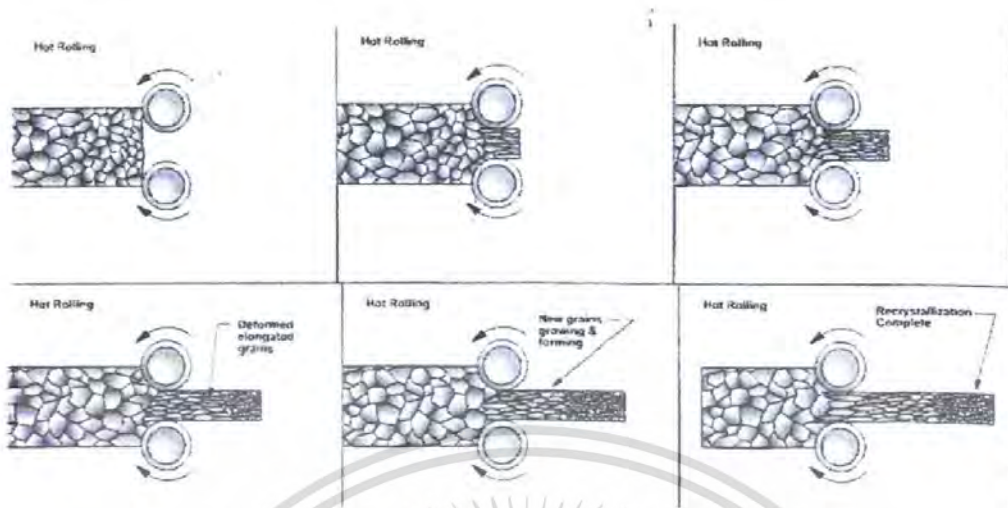
ข. การขึ้นรูปเย็น



รูปที่ 2.30 การเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาคในโลหะระหว่างการรีดเย็น

เมื่อผ่านการขึ้นรูปเย็น เกรนของโลหะจะเกิดการแปรรูปไปด้วย ทำให้ได้เกรนที่มีรูปร่างยาวรีตามแนวการรีด และ รูปร่างของเกรนนี้จะคงอยู่ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปเย็นเหล่านี้ ได้แก่ เหล็กแผ่นรีดเย็น ลวดเหล็ก ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในโลหะระหว่างการรีดร้อน

ส่วนในการรีดร้อน หลังจากผ่านการรีดใหม่ๆ เกรนของโลหะมีการแปรรูปไปตามแนวรีดที่จริง แต่เนื่องจากอุณหภูมิในการรีดร้อนเป็นอุณหภูมิที่สูงพอ ทำให้เกิดกระบวนการที่เรียกว่า “ การคืนสภาพ “ (Recovery) และ “ การตกผลึกใหม่ “ (Recrystallization) ไปด้วย เมื่อเสร็จสิ้นการรีด ลักษณะของเกรนที่ได้จะกลับเป็นเกรนค่อนข้างกลม และมีความละเอียดสูงชันกว่ารีดเย็น

ดังนั้น โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ และปานกลาง ซึ่งประกอบด้วยเกรนของเฟอร์ไรต์ และเพิร์ลไลต์ โดยมีปริมาณโครงสร้างเพิร์ลไลต์มากขึ้นตามปริมาณคาร์บอนที่ผสมในเหล็กกล้า นั้น รูปร่างของเกรนเฟอร์ไรต์ - เพิร์ลไลต์ ยังจะขึ้นกับกระบวนการผลิตว่าเหล็กนั้นผ่านการรีดร้อนหรือรีดเย็นมา (หรืออาจจะเป็นกระบวนการขึ้นรูปร้อน / ขึ้นรูปเย็น อื่นๆ เช่น การทุบขึ้นรูป - Forging การดึงลวด การลากขึ้นรูป ฯลฯ)

นอกจากนี้หากนำโลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น มาอบที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ของโลหะนั้นๆ ก็จะทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยน เกิดกระบวนการคืนสภาพและการตกผลึกใหม่ในระหว่างการอบนี้ ทำให้ได้โครงสร้างเกรนเป็นเกรนค่อนข้างกลม กระบวนการนี้จัดเป็นกรรมวิธีทางความร้อนเช่นกัน เรียกว่าการอบอ่อน (Annealing) หรือการอบอ่อนหลังขึ้นรูปเย็น (Cold Work Annealing)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยของโครงการการศึกษาการวัดความเค้นคงค้างโดยใช้ XRD นี้จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอน 1 หลักการของเครื่อง X-Ray Diffractometer Bruker AXS Model D8 Discover

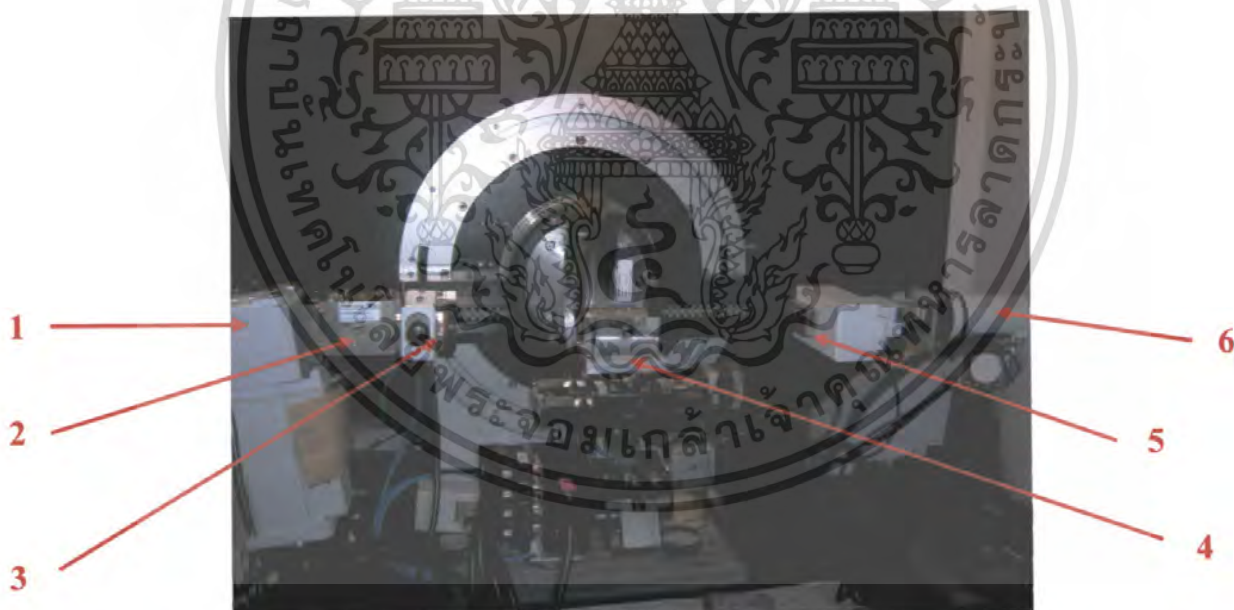
ขั้นตอน 2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ Residual stress

ขั้นตอน 3 การเตรียมสารตัวอย่าง

ขั้นตอน 4 การวัดและวิเคราะห์ความเค้นคงค้างของสารตัวอย่าง

โดยจะมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

3.1 หลักการของเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Bruker AXS Model D8 Discover



รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของระบบ XRD Bruker AXS Model D8 Discover

หมายเลข 1 คือ X-Ray tube

หมายเลข 2 คือ Gobel Mirror

หมายเลข 3 คือ Aperture slit system

หมายเลข 4 คือ sample carrier

หมายเลข 5 คือ Detecture slit system

หมายเลข 6 คือ Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ XRD Bruker AXS Model D8 Discover แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 ส่วนกระตุ้น (excitation) คือ หมายเลข 1 : หลอดรังสีเอ็กซ์ (X-Ray tube)

ส่วนที่ 2 ส่วนการเลี้ยวเบน (diffraction) คือ หมายเลข 2-5 : ดิฟเฟรคโตรมิเตอร์ (diffractometer)

ส่วนที่ 3 ส่วนการตรวจจับ (detection) คือ หมายเลข 6 : ตัวตรวจจับรังสี (Detector)

ส่วนที่ 1 ส่วนกระตุ้น (excitation) คือ หลอดรังสีเอ็กซ์ (X-Ray tube)

หลอดรังสีเอ็กซ์ (X-Ray tube) จะมีรูปร่างโครงสร้างแบบหลอดในแนวตั้ง (tube stand) และหลอดทำด้วยเซรามิกส์ (ceramic tube stand) หน้าต่างทางออกของรังสีเอ็กซ์เป็นแบบหลอดรังสีเอ็กซ์แบบปลายปิด (end window) เป้าโลหะ(target)ของหลอดรังสีเอ็กซ์จะทำด้วยทองแดง (Cu) มีค่าความยาวคลื่นเท่ากับ 1.54060 อังสตรอม โดยลำรังสีเอ็กซ์มีขนาด 40 ม.ม. จะผ่านตรงช่องทางออกหรือหน้าต่างซึ่งหลอดรังสีเอ็กซ์นี้จะติดอยู่กับ Göbel mirror Radiation



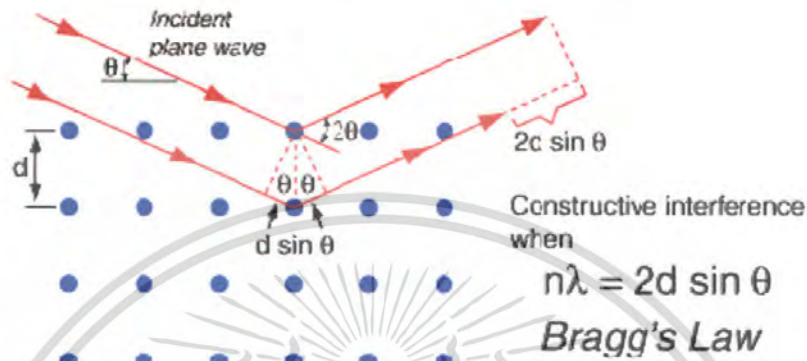
รูปที่ 3.2 หลอดรังสีเอ็กซ์

ส่วนที่ 2 ส่วนการเลี้ยวเบน (diffraction) หรือ ดิฟเฟรคโตรมิเตอร์ (diffractometer)

รังสีเอ็กซ์จากสารตัวอย่างจะไปตกกระทบที่ผลึก (crystal) แล้วเลี้ยวเบน (diffraction) ออกจากผลึก (crystal) ของสารตัวอย่างโดยมีความยาวคลื่นเท่ากับรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบ รังสีเลี้ยวเบนไปตกกระทบยังหัวตรวจจับ (Detector) หัวตรวจจับจะทำหน้าที่สแกนไปรับความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งมุมต่างๆ โดยที่หัววัดรังสีจะดูดกลืนโฟตอนรังสีเอ็กซ์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณพัลส์ของกระแสไฟฟ้า (Electric current) ที่พรีแอมพลิไฟร์ (preamplifier) และแอมพลิไฟร์ (amplifier) ซึ่งมีความเข้มของรังสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึก



รูปที่ 3.3 แสดงการเลี้ยวเบนตามกฎ Bragg's Law

สำหรับตัวเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์นั้นส่วนของการเลี้ยวเบนจะประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่สแกนชิ้นงานที่ค่ามุมต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ฐานที่วางชิ้นงาน (Sample carrier) โดยจะบอกตำแหน่งของชิ้นงานในแกน x แกน y แกน Z ด้วยและนอกจากนี้ตัวฐานวางชิ้นงานเองก็ยังสามารถหมุนไปในแนวแกน Phi (φ) และ Psi (ψ) ได้อีกด้วย



แกน Phi (φ)

ฐาน XYZ

รูปที่ 3.4 แสดงฐานวางชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Detector slit system

เป็นอุปกรณ์ในการรับลำแสงที่ทำการเลี้ยวเบนผ่านชิ้นงานมาแล้ว โดยจะติดตั้งอยู่ที่ส่วนหน้าของ Detector และจะมีช่องไว้ใส่ slit อยู่ 2 ช่อง ไว้สำหรับกำหนดลำแสงที่จะผ่านตัว Detector ซึ่งอุปกรณ์ตัวนี้จะสแกนไปรับความยาวคลื่นที่มุมต่างๆ



รูปที่ 3.5 แสดง Detector slit system ที่ติดอยู่กับ Detector



รูปที่ 3.6 แสดงช่องใส่ slit ของ Detector slit system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 3 ส่วนการตรวจวัด (Detector)

ส่วนการตรวจจับนี้จะทำหน้าที่ในการตรวจวัดลำรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนมาจากสารตัวอย่างสลิต (slit system) คือเทคเตอร์ที่ใช้จะเป็นแบบ ซิลทิลเลชัน คีเทคเตอร์ (Scintillation counter)



รูปที่ 3.7 Detector

3.2 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ Residual stress

ก. อุปกรณ์เสริมที่ใช้ในการปรับตำแหน่ง (Aligment)

1.) เหล็กปลายแหลม



รูปที่3.8 แท่งเหล็กปลายแหลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.) กล้องขยาย ภายในจะมีสเกลใช้ในการดูตำแหน่งเหล็กปลายแหลมซึ่งจะติดเพิ่มที่ตัวโกนิโอมิเตอร์



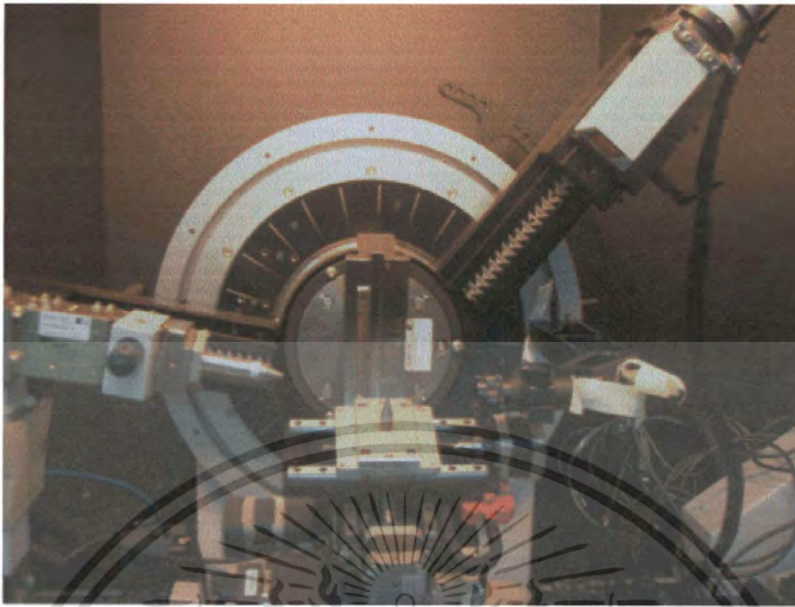
รูปที่ 3.9 กล้องที่ใช้เป็นตัวช่วยขยายภาพ

- 3.) กล้องช่วยในการแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ จะทำให้ช่วยเพิ่มการมองเห็นจุดยอดของเหล็กปลายแหลม ทำให้การปรับตำแหน่งถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 3.10 กล้องที่สามารถแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงภาพรวมของการติดตั้งชุดอุปกรณ์เสริมที่ช่วยในการปรับแต่ง

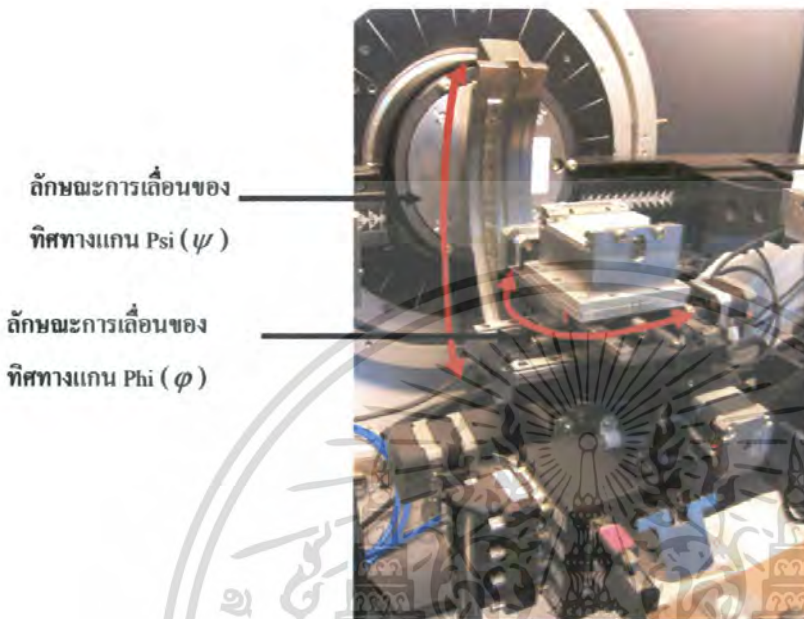
ข. ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและวิเคราะห์ Residual stress ของเครื่องเดียวเบนรังสีเอกซ์



รูปที่ 3.12 แสดงภาพรวมของการติดตั้งอุปกรณ์ในการวัดความเค้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าความเค้นคงค้างนั้น จะต้องใช้แกน Psi (ψ) และแกน Phi (ϕ) เป็นหลัก



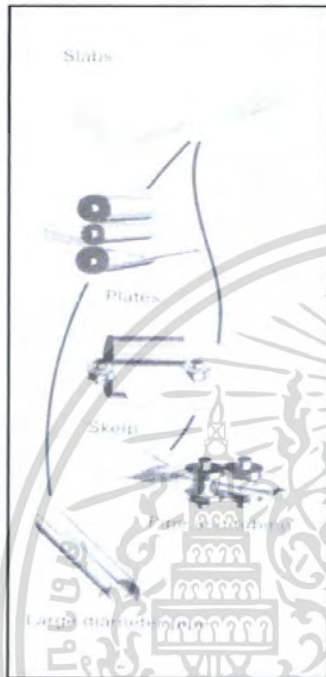
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการเลื่อนของแกน Psi (ψ) และ Phi (ϕ)

3.3 การเตรียมสารตัวอย่าง (Sample preparation)

ในการทดลองนี้จะใช้เหล็กกล้าคาร์บอนหรือเหล็กแอลฟาในการหาค่าความเค้น 3 ชนิดด้วยกัน ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้สารตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยการขึ้นรูปทั้งการขึ้นรูปแบบร้อน (Hot-finished) และการขึ้นรูปเย็น (Cold-finished) โดยการขึ้นรูปร้อนนั้นจะขึ้นรูปเหล็กกล้าเป็นรูปทรงต่างๆ ในขณะที่ลักษณะร้อนแดงหรือมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ ซึ่งในกระบวนการนี้เกิดปรากฏการณ์ตกผลึกใหม่ (Recrystallization) รวมทั้งการดิสโลเคชัน ช่วงอุณหภูมิของการขึ้นรูปร้อนอยู่ที่ 815 °C ถึง 1260 °C ส่วนการขึ้นรูปเย็นเป็นสภาวะการณ์ที่เหล็กถูกลดขนาดของหน้าตัดลงและทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างของเหล็กในสภาวะการขึ้นรูปเย็นเสมือนได้รับแรงดึงหรือแรงอัดที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เหล็กสามารถยืดหดตัวได้(plastic deformation)และในที่สุดเหล็กจึงมีความแข็งแรงและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ผลที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างเหล็ก ได้แก่ เกรนมีขนาดเล็กลง และดิสโลเคชัน (dislocation) ภายหลังจากขึ้นรูปแบบร้อนและนำมาขึ้นรูปแบบเย็นด้วยการรีดผ่านแท่นเหล็ก หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดึงผ่านแม่พิมพ์เพื่อลดขนาดรูปทรงแต่ละลำดับจนกระทั่งได้เป็นเหล็กรูปพรรณประเภทต่างๆ เช่น เหล็กทอกลม เหล็กแผ่นบาง ลวดเหล็ก ซึ่งหมายเลข 2 และ 3 (รูปที่ 3.17) นั้นได้ผ่านการกระบวนการดังกล่าวมาแล้วผู้ทดลองจึงสนใจที่จะทำการวัดหาค่าความเค้นคงค้างภายในชิ้นงาน



รูปที่ 3.14 แสดงกระบวนการขึ้นรูปของเหล็กทอกลม

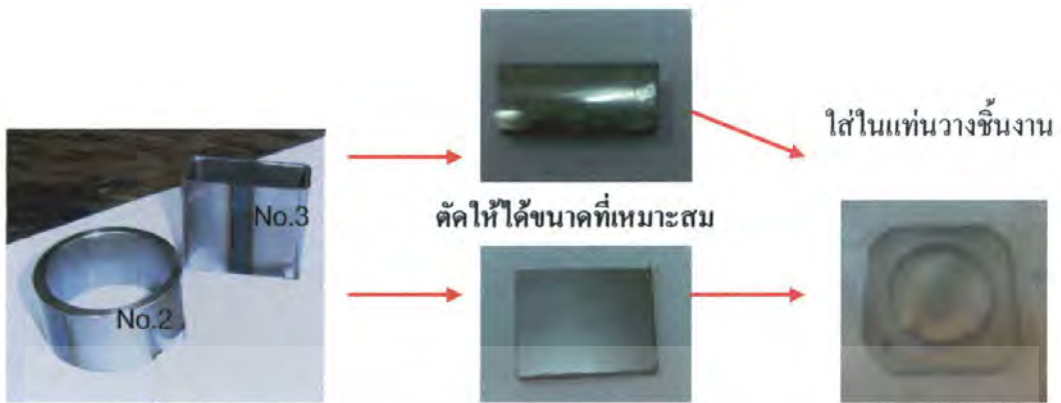


รูปที่ 3.15 แสดงการขึ้นรูปของเหล็กแผ่น โดยขึ้นรูปเป็นลักษณะต่อทรงกระบอกและสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.16 เหล็กแผ่นขนาด 5x5x3 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะของเหล็กท่อกลม (No.2) และ เหล็กท่อสี่เหลี่ยม (No.3)

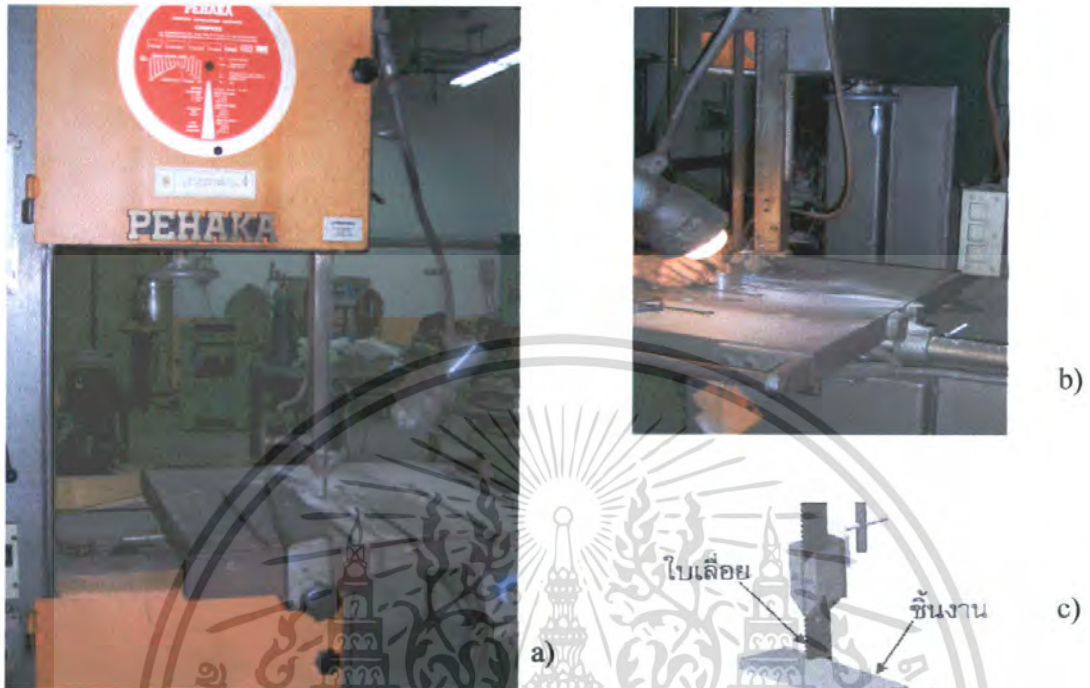
สำหรับชิ้นงานหมายเลข 2 และ 3 นั้นเนื่องจากมีรูปทรงที่ไม่สามารถวางที่ตัวฐานวางชิ้นงานได้จึงจะต้อนนำมาตัดเพื่อให้สามารถนำมาวางบนฐานวางชิ้นงานได้ ซึ่งจะต้องนำมาวางในแท่นใส่ชิ้นงานก่อนนำไปวางใน sample carries ของตัวเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยจะใช้เครื่องเลื่อยสายพานในการตัดชิ้นงาน

เลื่อยสายพาน (Band Saw)

เครื่องตัดชนิดใบเลื่อยเวลาใช้งานจะเป็นลักษณะสายพานหมุนเป็นรอบในแนวตั้งตั้งแกส่วนชิ้นงานเข้าหาคมตัดของใบเลื่อยที่จับยึดอยู่กับที่ แต่ใบเลื่อยจะเคลื่อนที่ในแนวตั้งทำให้เวลาที่เราจะตัดจะเสียดสีที่ใหม่ของใบเลื่อยตลอดเวลา

เลื่อยสายพานนี้เหมาะที่จะใช้ในการตัดโลหะแผ่นบาง (Sheet) แผ่นหนา (plate) และเป็นแท่ง (bar) ที่ความหนาไม่มากนัก โดยเลื่อยสายพานนี้จะมีแบบที่ใช้สารหล่อเย็นได้ด้วย แต่โดยมากมักเป็นการตัดแห้ง ซึ่งต้องระวังเรื่องของความร้อนที่เกิดจากการตัดด้วยและไม่ให้ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างใบเลื่อยกับชิ้นงานมากจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคได้ ส่วนเนื้อโลหะบริเวณรอยตัดและกินลึกเข้ามา โครงสร้างจุลภาคของโลหะจะมีการเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลมาจากการตัดซึ่งสามารถขจัดออกด้วยกระดาษทราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 a) แสดงเลื่อยสายพาน (Band Saw) b) ขณะเครื่องทำงาน
c) ลักษณะของฟันเลื่อยที่ตัด

3.4 การวัดและวิเคราะห์ความเค้นคงค้างของสารตัวอย่าง

3.4.1 ศึกษาการปรับแต่ง (Alignment) และ การปรับเทียบ (Calibration) ของเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของระบบการวัดความเค้น

ในการวัดวิเคราะห์ความเค้นคงค้าง (Residual stress) นั้นจะต้องทำการยิงรังสีเอ็กซ์ลงไปที่ชิ้นงาน ซึ่งในการวัดนี้จะต้องทำการวัดที่มุม φ คงที่กับมุม ψ ต่างๆ คำนวณความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.4 ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการปรับตำแหน่งของฐานวางชิ้นงาน

(stage XYZ) โดยการปรับแต่งฐานวางชิ้นงานนั้นแกน φ และแกน ψ จะต้องสัมพันธ์กัน สำหรับฐานวางชิ้นงาน (stage XYZ) จะต้องทำการปรับค่าแกน XYZ ให้ได้จุดโฟกัส โดยหลักการของการวัดความเค้นคงค้างโดยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์นั้นจะต้องทำการเลื่อนฐานวางชิ้นงานไปยังแกน ψ ต่างๆแล้ว จุดโฟกัสที่รังสีเอ็กซ์จากหลอดรังสีเอ็กซ์ (X-ray tube) มาเลี้ยวเบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องเป็นจุดเดียวกันทุกครั้งที่เราเลื่อนแกน ψ ไป โดยที่รังสีเอ็กซ์จะยิงลงมาที่ชิ้นงานเพียงตำแหน่งเดียว เนื่องจากในการทดลองนั้นจะต้องทำการเลื่อนเบนรังสีเอ็กซ์เพื่อหาค่าความแตกต่างระหว่างระนาบว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่เมื่อมีการเลื่อนฐานวางชิ้นงานไปในแนวแกน ψ ทีละตำแหน่ง ซึ่งหากเลื่อนชิ้นงานไปไปในแนวแกน ψ แล้วตำแหน่งโฟกัสของ XYZ เปลี่ยนแปลงไป อาจจะทำให้มีผลต่อการวัดความแตกต่างระหว่างระนาบ ซึ่งจะส่งผลให้ผลการทดลองนั้นคลาดเคลื่อนได้โดยจะทำให้ค่าความเค้นที่ได้นั้นไม่ถูกต้อง เราจึงจำเป็นต้องทำการปรับตำแหน่งฐานวางชิ้นงานให้ถูกต้องและแม่นยำที่สุดเพื่อจะสามารถทำให้ทราบได้ว่าผลการทดลองที่ได้นั้นเป็นค่าความเค้นคงค้างของชิ้นงานจริงๆ ไม่ใช่ค่าที่เกิดจากความผิดพลาดของเครื่องมือวัด โดยการปรับแต่งตำแหน่ง (Alignment) ฐานวางชิ้นงาน (stage XYZ) มีขั้นตอนดังนี้

ก. การปรับตำแหน่งของฐานวางชิ้นงาน (Stage XYZ)

ในการปรับตำแหน่งฐานวางชิ้นงานนั้น จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริม คือ กล้องซึ่งภายในมีสเกลสำหรับอ่านค่าโดยนำตัวกล้องยึดติดกับแขนของโกนิโอมิเตอร์ส่งไปที่ตำแหน่งของส่วนรองรับสารตัวอย่างซึ่งส่วนรองรับสารตัวอย่างนั้นจะมีแท่งเหล็กปลายแหลมติดตั้งไว้ในตำแหน่งของสารตัวอย่าง โดยกล้องนี้จะถือเป็นกล้องหลักเพราะเป็นตัวชุดอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยตรง และกล้องหลักนี้จะใช้กล้องเสริมในการมองแท่งเหล็กปลายแหลม โดยจะติดอยู่ตรงเส้นศึ่งของกล้องที่ใช้มองแท่งปลายแหลม โดยภาพที่เห็นจะแสดงผลยังหน้าจอคอมพิวเตอร์เพื่อจะช่วยให้ง่ายต่อการสังเกตว่าการสังเกตด้วยตาเปล่า เมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งของที่รองรับสารตัวอย่างที่มีแท่งเหล็กปลายแหลมติดตั้งไว้ โดยจะแสดงการติดตั้งอุปกรณ์

ดังรูปที่ 3.19

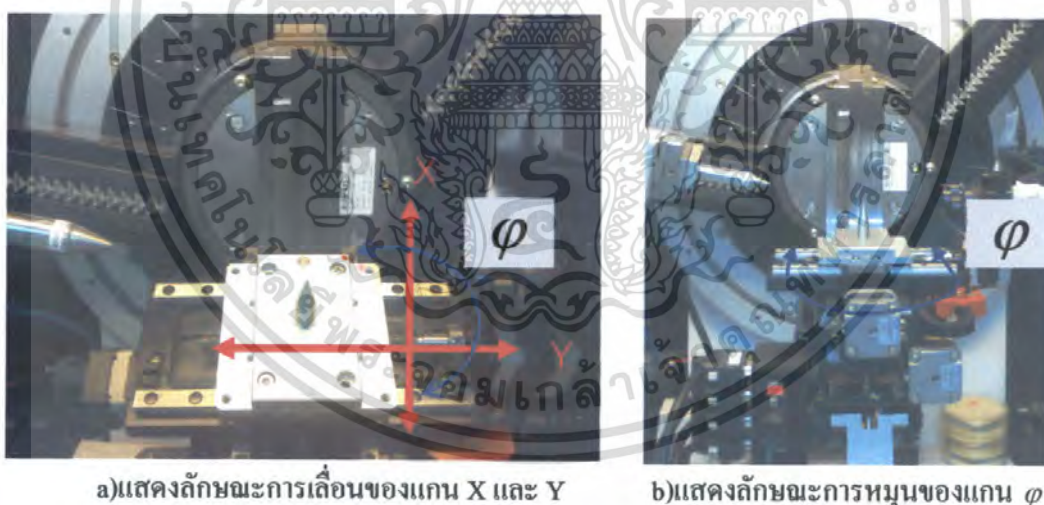


รูปที่ 3.19 แสดงการจัดวางตำแหน่งแท่งปลายแหลม ในการปรับ (Alignment) ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

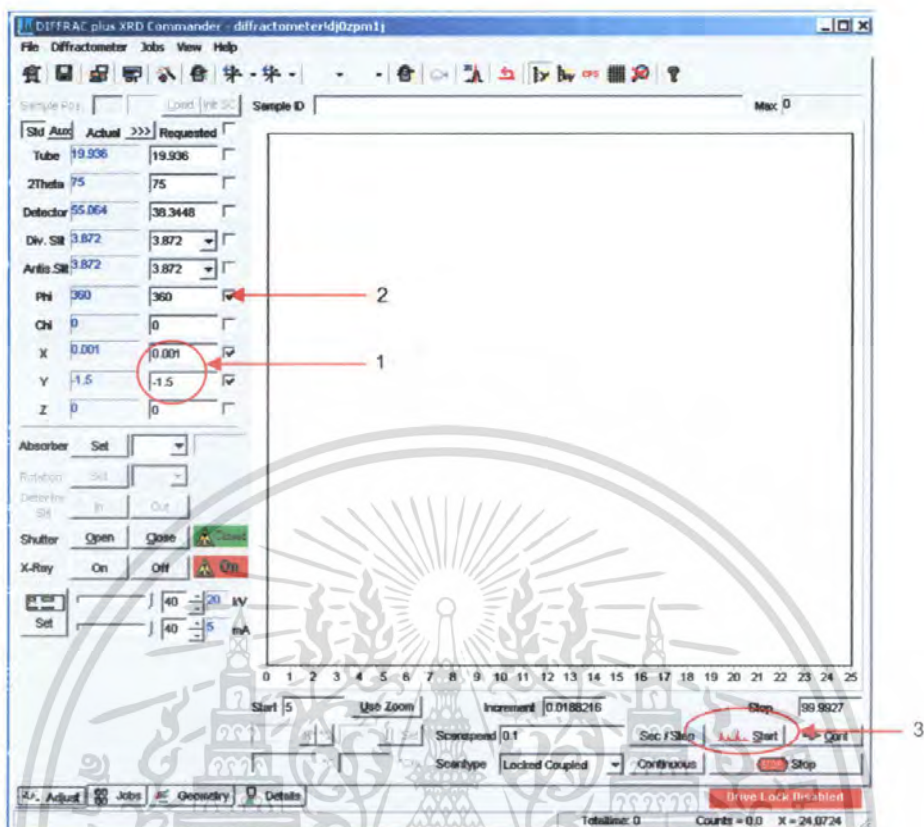
เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.11 เรียบร้อยแล้วทำการวางแท่งเหล็กปลายแหลมไว้ที่ตำแหน่งของสารตัวอย่าง แล้วทำตามขั้นตอนดังนี้

- 1.) มองผ่านกล้องให้เห็นตำแหน่งของแท่งเหล็กปลายแหลม
- 2.) เปิดโปรแกรม DIFFRAC plus เพื่อใช้ในการปรับตำแหน่งฐานวางชิ้นงาน
- 3.) เริ่มจากการปรับตำแหน่งของแกน X และ Y ให้ได้จุดโฟกัสก่อน แล้วต่อมาจึงค่อยปรับแกน Z โดยทั้งแกน X,Y และ Z นั้นจะต้องตั้งฉากซึ่งกันและกัน ทำการใส่ค่าแกน X และ Y แล้วทำการหมุนฐานวางชิ้นงานโดยปรับที่แกน ϕ เพื่อตรวจสอบว่าค่าแกน X และ Y นั้นได้ตำแหน่งโฟกัสหรือไม่ ซึ่งลักษณะของการเลื่อนของแกน X, Y และ ϕ นั้นจะแสดงดังรูปที่ 3.20 โดยจะต้องสังเกตตำแหน่งของปลายแท่งจากภาพหน้าจอคอมพิวเตอร์ว่าขณะที่หมุนฐานวางชิ้นงานนั้นแท่งเหล็กปลายแหลมอยู่ที่ตำแหน่งเดิมหรือไม่ ถ้ามีการแกว่งให้ปรับตำแหน่ง X และ Y ใหม่แล้วหมุนแกน ϕ เพื่อตรวจสอบอีกครั้ง ทำจนกว่าเมื่อหมุนฐานวางชิ้นงานแล้วปลายแหลมของแท่งเหล็กไม่มีการแกว่ง โดยค่าของแกน X และ Y ที่ทำให้ปลายแหลมของแท่งไม่แกว่งนั้น จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดแกนของฐานวางชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการปรับตำแหน่งฐานวางชิ้นงานจะแสดงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 แสดงการเลื่อนของแกน X, Y และ ϕ

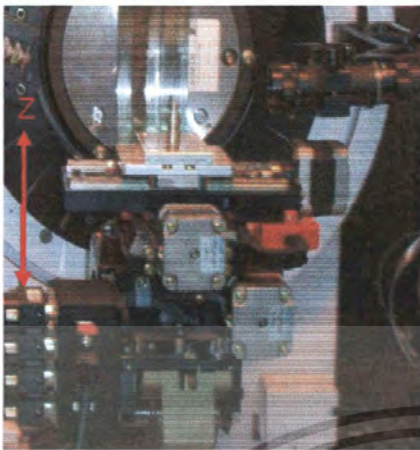
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการปรับตำแหน่งฐานวางชิ้นงาน
จากรูป หมายเลข 1 ใสค่าตำแหน่งของแกน X และ Y
หมายเลข 2 กำหนดมุมให้แกน ϕ หมุนไปที่ละ 90 องศา
หมายเลข 3 กด start เริ่มทำงาน

4.) หลังจากที่ทำการปรับตำแหน่งฐานวางชิ้นงานในแกน X และ Y เรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการปรับแกน Z ให้สัมพันธ์กับแกน X และ Y ที่ทำการปรับตำแหน่งเรียบร้อยแล้ว โดยเริ่มจากการสั่งให้แกน ψ เลื่อนจากมุม 0 ถึง 60 องศา แล้วดูปลายแหลมของแท่งเหล็กว่าขณะเลื่อนแกน ψ ปลายแหลมของแท่งเหล็กมีเปลี่ยนตำแหน่งหรือไม่ หากปลายแท่งเหล็กไม่อยู่ที่ตำแหน่งเดิมให้ทำการปรับเปลี่ยนค่าฐาน Z แล้วสั่งให้ฐานวางชิ้นงานหมุนไปตามแกน ψ อีก ปรับค่าแกน Z ไปจนกว่าปลายยอดของแท่งเหล็กจะอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ซึ่งลักษณะการปรับปรับตำแหน่งของแนวแกน Z และการเลื่อนของแกน ψ จะแสดงดังรูปที่ 3.22 โดยทั้งค่าแกน X,Y และ Z ที่ได้จุดโฟกัสแล้วจะนำมาใช้ในการตั้งค่าตัวฐานวางชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองต่อไป ซึ่งโปรแกรมจะทำตามขั้นตอนดังรูปที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a)



b)

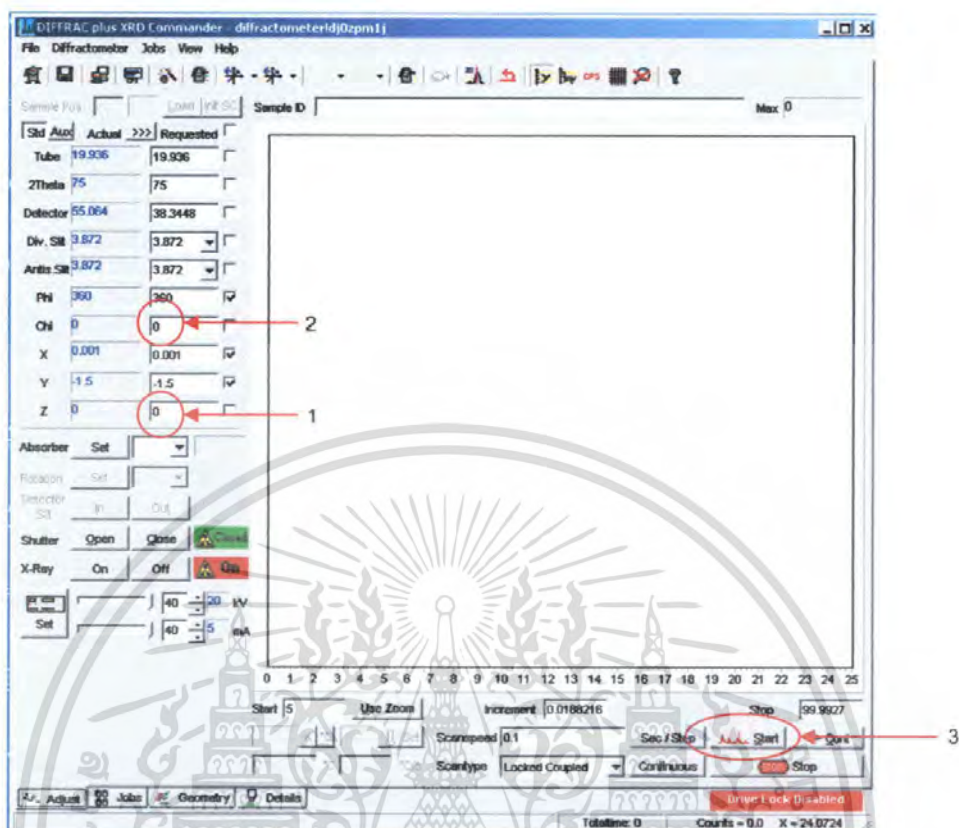
รูปที่ 3.22 a) แสดงลักษณะการปรับตำแหน่งของแนวแกน Z

b) รูปแสดงการเลื่อนของแกน Psi (ψ)



รูปที่ 3.23 แสดงปลายแหลมของแท่งเหล็ก
ที่แสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ระหว่างการ
เลื่อนแกน ψ จะต้องอยู่ที่ตำแหน่งเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการปรับตำแหน่งแกน Psi

จากรูป หมายเลข 1 ใส่ค่าตำแหน่งแกน Z

หมายเลข 2 กำหนดมุม ψ ให้เลื่อนขึ้นไป 90°

หมายเลข 3 กด start เริ่มทำงาน

ข. การปรับเทียบ (Calibration)

เมื่อทำการปรับแต่งตำแหน่งของตัวชุดเครื่องเดี่ยวเบนริงส์อิเล็กทรอนิกส์เรียบร้อยแล้ว จะต้องมาทำการปรับเทียบเพื่อตรวจสอบค่าตำแหน่งที่ทำการปรับแต่งนั้นสามารถนำมาใช้ทำการวิเคราะห์หาค่าความเค้นได้หรือไม่ โดยในที่นี้จะใช้สารตัวอย่างที่เป็นทั้งสแตนเลส (free stress) ซึ่งเป็นตัวมาตรฐานที่กำหนดแล้วว่าไม่มีค่าความเค้นใช้ในการทดสอบ โดยจะมีขั้นตอนเหมือนกับการทำการทดลอง (จะกล่าวในหัวข้อถัดไป) ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นจะต้องวัดค่าความเค้นของทั้งสแตนเลสได้ไม่เกิน ± 14 MPa ซึ่งหากทำการทดลองแล้วปรากฏว่าค่าความเค้นที่ได้เกินค่าดังกล่าวแล้ว จะต้องทำการปรับแต่ง (alignment) เครื่องมือใหม่ ซึ่งจะต้องการปรับแต่งฐานวางชิ้นงานในแกน X, Y และ Z ให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่วัดค่าความเค้นแล้วไม่เกิน ± 14 MPa อ้างอิงตามมาตรฐานของ ASTM (E915-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

90 Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement) ถึงจะเรียกได้ว่าได้ทำการปรับแต่งตำแหน่งได้ถูกต้องและเมื่อถูกต้องแล้วก็สามารถทำการทดลองกับสารตัวอย่างที่จะนำมาทดลองได้ในลำดับต่อไปได้

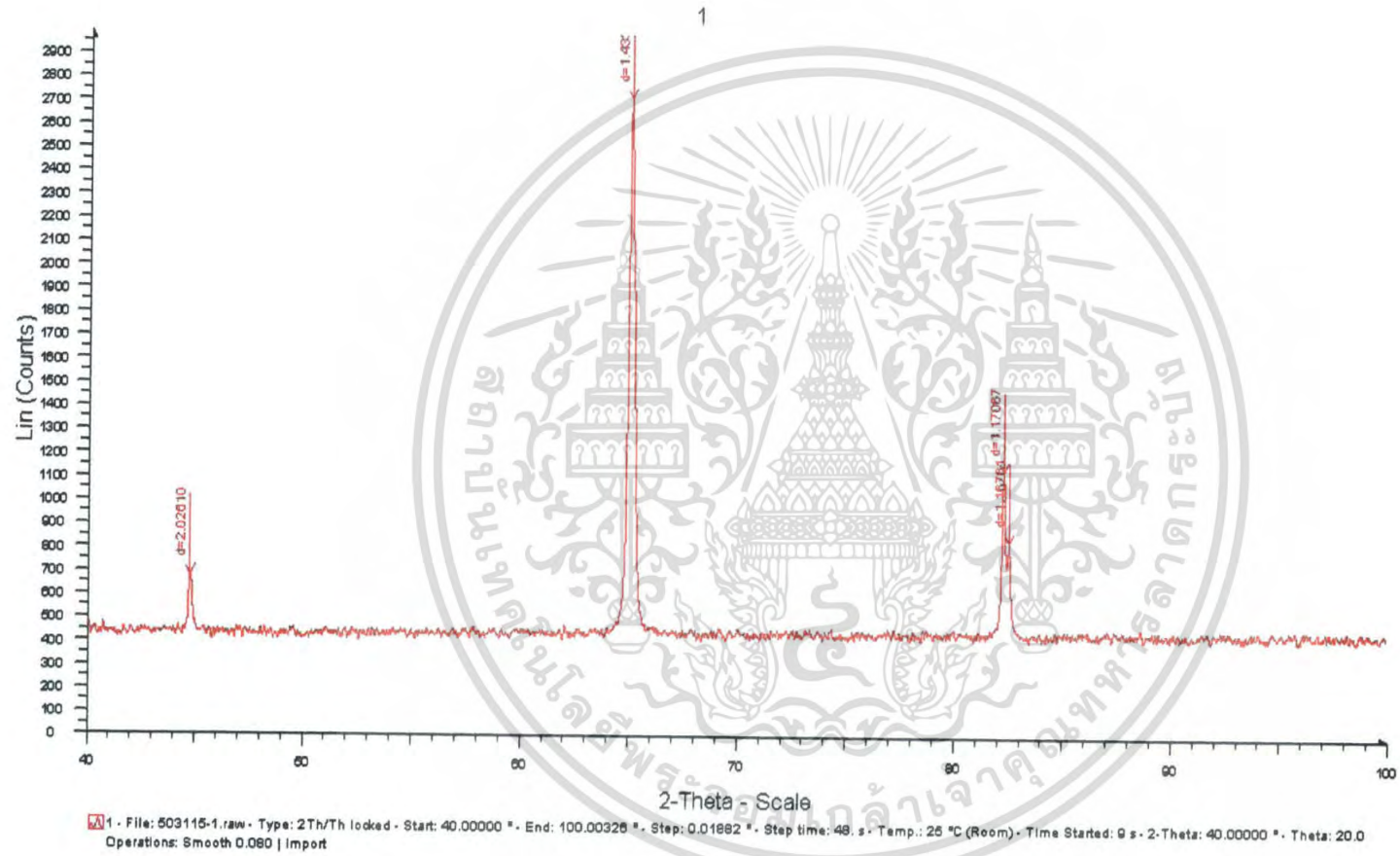


รูปที่ 3.25 แสดงทั้งสแตน (free Stress) ที่ใช้ในการปรับเทียบ(Calibration)

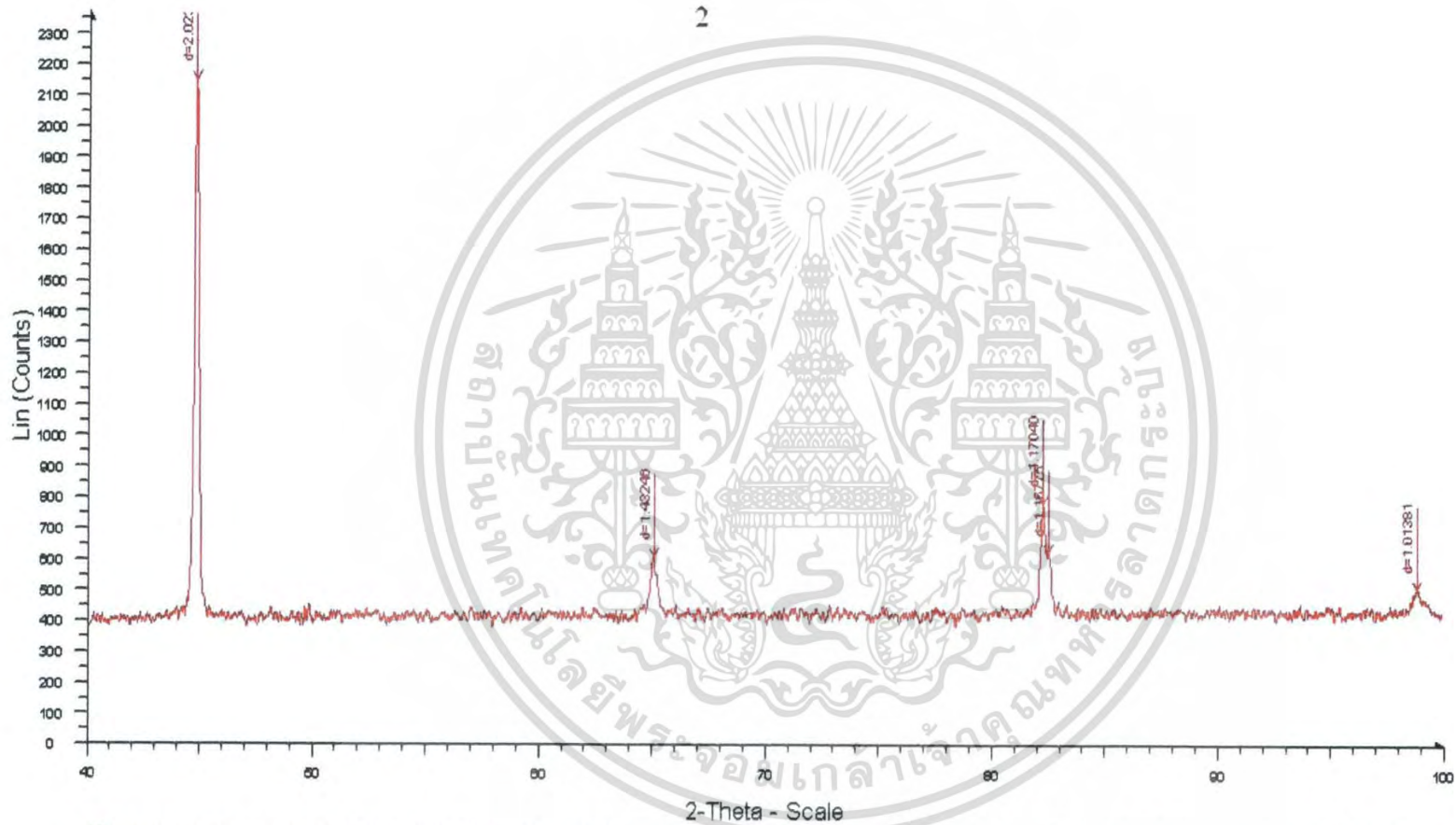
3.4.2 วิธีการทดลอง

ก. หาค่ามุม 2θ ของเหล็กแผ่น , เหล็กท่อกลมและเหล็กท่อนี่เหลี่ยม เพื่อใช้วัดความเค้นดัดข้าง นำเหล็กแผ่น , เหล็กท่อกลมและเหล็กท่อนี่เหลี่ยม มาทำการวัดการเลี้ยวเบน โดยจะเลือกมุม 2θ ที่มากที่สุดที่เกิดพีคของการเลี้ยวเบนของทั้ง 3 ตัวอย่าง ณ ที่นี้เลือกมุม 2θ ระหว่าง 81.5° ถึง 83.2° จากรูปที่ 3.26 ถึง รูปที่ 3.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

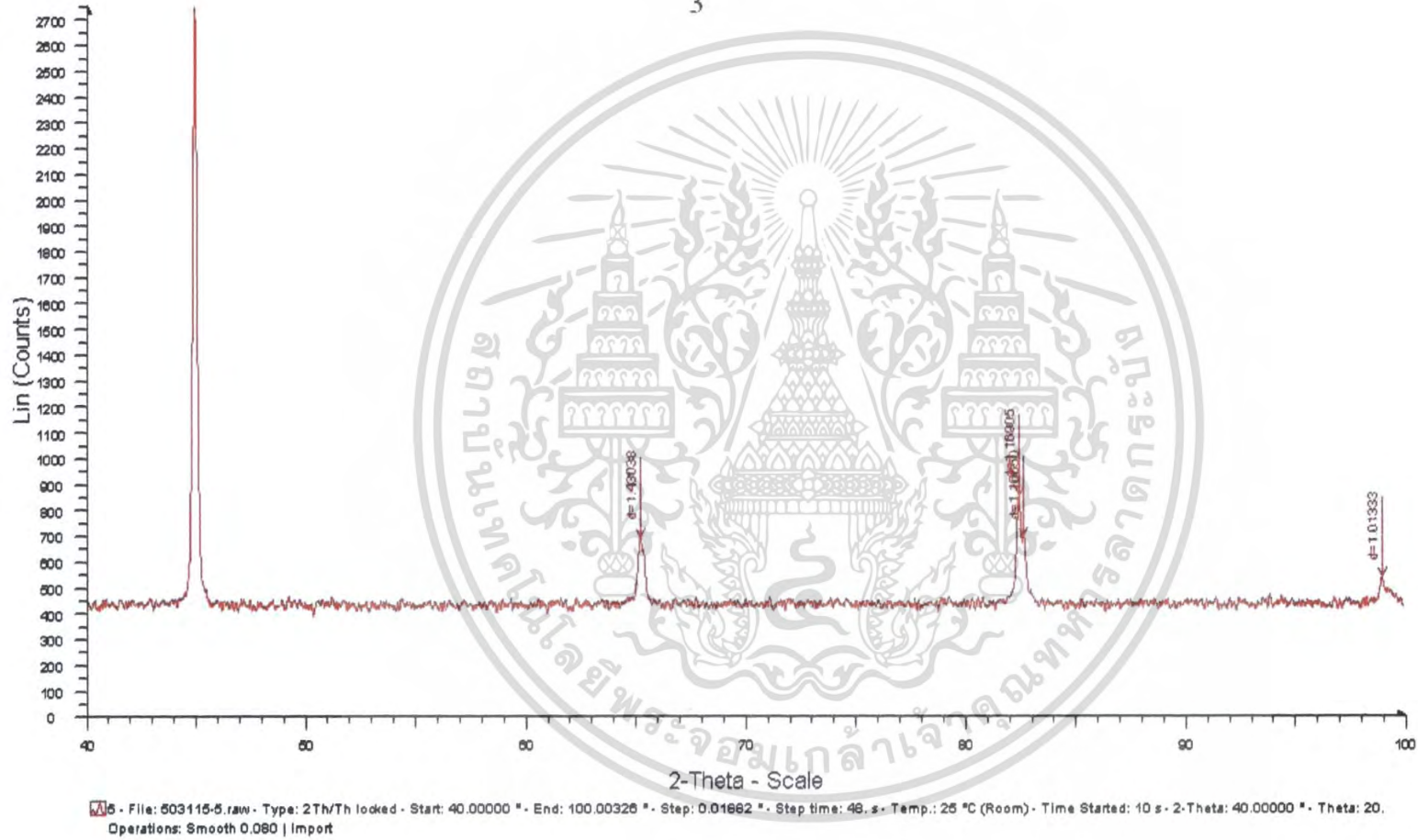


รูปที่ 3.26 แสดงภาพพืดของเหล็กแผ่น



File: 603116-4.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 40.00000 ° - End: 100.00326 ° - Step: 0.01882 ° - Step time: 48. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 10 s - 2-Theta: 40.00000 ° - Theta: 20. Operations: Smooth 0.080 | Import

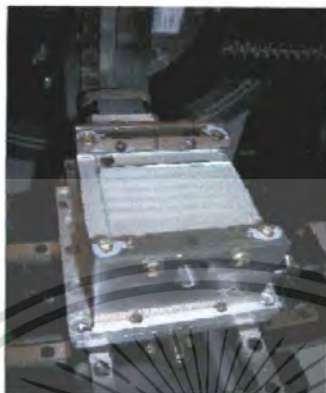
รูปที่ 3.27 แสดงภาพพิกของเหล็กที่อกลม



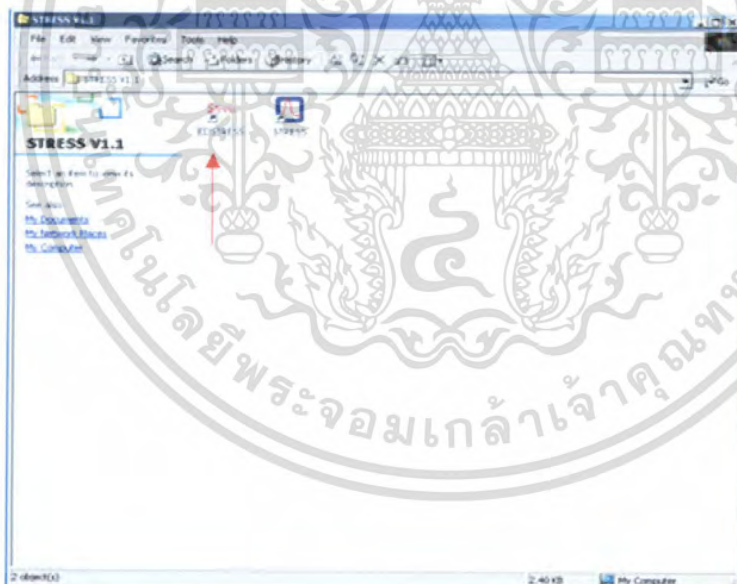
รูปที่ 3.28 แสดงภาพพีคของเหล็กทอสีเหลี่ยม

ข. การวัดความเค้นคงค้าง

1) นำทั้งสแตน (free Stress) ใส่ที่วางชิ้นงานดังรูป และติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องใช้
เรียบร้อย



2) เปิดโปรแกรม Ed Stress



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการกำหนด

3.1) ตั้งค่าแกนPhi (φ)



รูปที่ 3.29 แสดงขั้นตอนการกำหนดตัวแปรต่างๆ ในแกน φ

จากรูป หมายเลข 1 ได้ชื่อ operator

หมายเลข 2 เลือก Extended Build ของมุม φ เพื่อกำหนดค่ามุมในแกน φ

หมายเลข 3 กำหนดมุมเริ่มต้น โดยในการทดลองนี้เริ่มที่ $\varphi = 0^\circ$

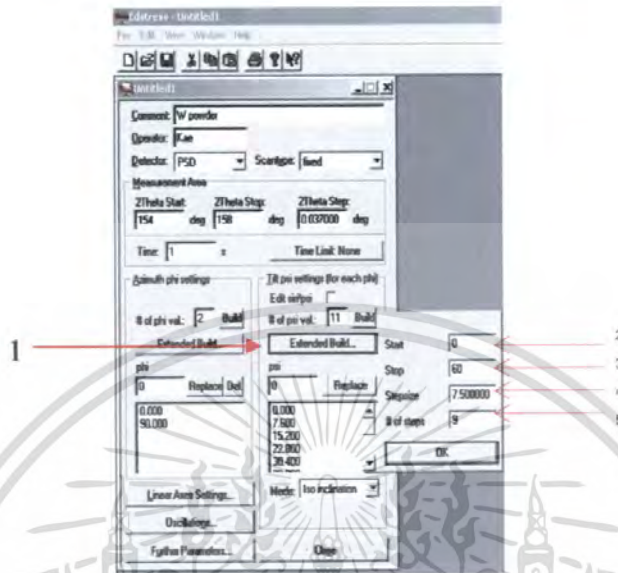
หมายเลข 4 กำหนดค่ามุมสุดท้ายที่ $\varphi = 90^\circ$

หมายเลข 5 กำหนดค่ามุมในการหมุนแต่ละครั้งของแกน φ ณ ที่นี้กำหนดให้หมุนทีละ 90°

หมายเลข 6 กำหนดจำนวนครั้งในการหมุนของแกน φ (ณ ที่นี้หมุน 2 ครั้ง คือที่มุม 0° และ 90°)แล้วกด ok

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

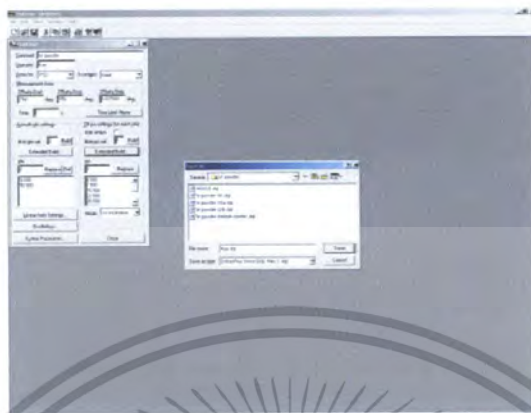
3.2) ตั้งค่าแกน Psi (ψ)



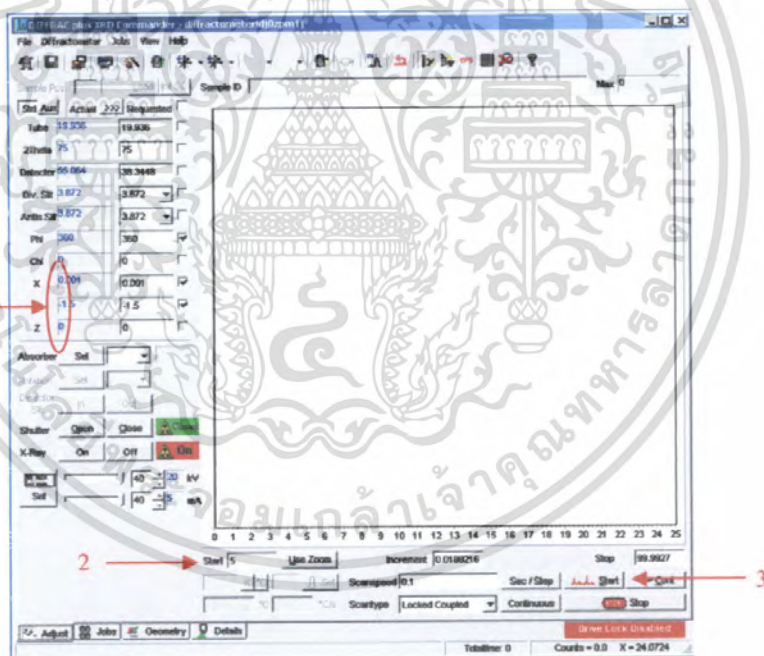
รูปที่ 3.30 แสดงขั้นตอนในการกำหนดตัวแปรของแกน ψ

- จากรูป หมายเลข 1 เลือก Extended Build ของ มุม ψ เพื่อกำหนดค่ามุมในแกน ψ
- หมายเลข 2 กำหนดมุมเริ่มต้น โดยในการทดลองนี้เริ่มที่ $\psi = 0^\circ$
- หมายเลข 3 กำหนดค่ามุมสุดท้ายที่ $\psi = 60^\circ$
- หมายเลข 4 กำหนดค่ามุมในการหมุนแต่ละครั้งของแกน ψ ณ ที่นี้ กำหนดให้เลื่อนทีละ 7.5°
- หมายเลข 5 กำหนดจำนวนครั้งในการหมุนของแกน ψ (ณ ที่นี้หมุน 9 ครั้ง คือที่มุม $0^\circ, 7.5^\circ, 15^\circ, 22.5^\circ, 30^\circ, 37.5^\circ, 45^\circ, 52.5^\circ$ และ 60°) แล้วกด ok

4) ทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ที่กำหนด



5) เปิดโปรแกรม DIFFRAC plus



จากรูป หมายเลข 1 ใส่ค่า X Y และ Z ที่ได้จากการปรับแต่งฐานวงจันทันซึ่งมีค่าดังนี้

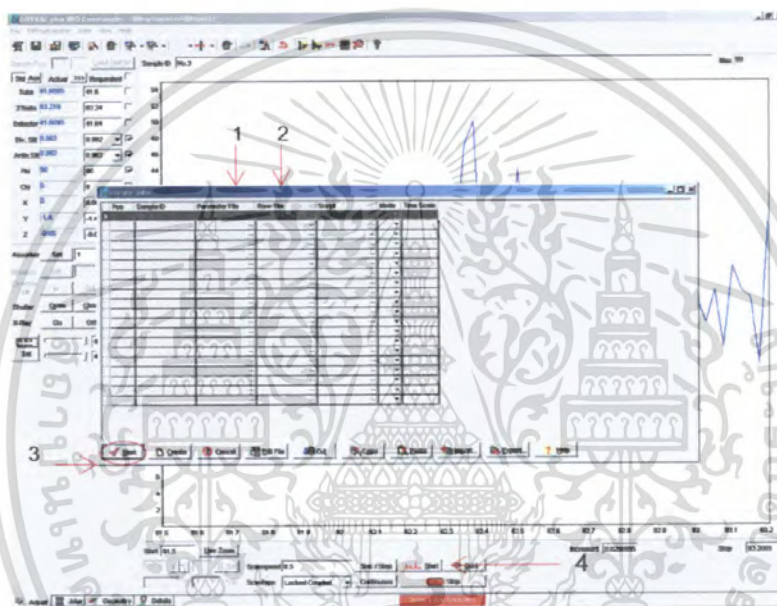
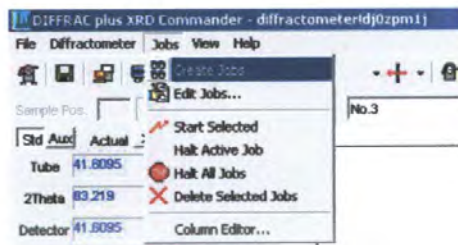
$$X = 0.001, Y = -1.4, \text{ และ } Z = -0.65$$

หมายเลข 2 กำหนดมุมเริ่มต้นของการเลี้ยวเบน (ทั้งสแกน เริ่มที่มุม 130°)

หมายเลข 3 กำหนดมุมสุดท้ายของการเลี้ยวเบน(ทั้งสแกน หยุดที่มุม 132.5°)

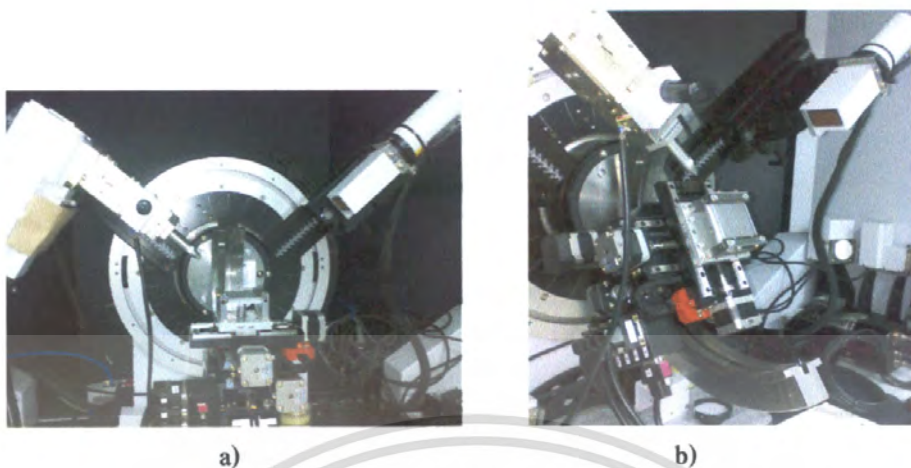
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) ทำการเลือก Jobs แล้วเลือก Create Jobs



- รูปที่ 3.31 แสดงลำดับขั้นตอนที่จะนำพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้มาใช้งาน
- หมายเลข 1 เลือก parameter file ที่ได้จากการกำหนดค่าต่างๆจากโปรแกรม Ed stress ที่บันทึกไว้จากข้อ 4)
- หมายเลข 2 กำหนด file สำหรับ save ผลการทดลอง
- หมายเลข 3 กด start เพื่อนำค่าพารามิเตอร์มาในการทดลอง
- หมายเลข 4 กด start เพื่อให้เครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



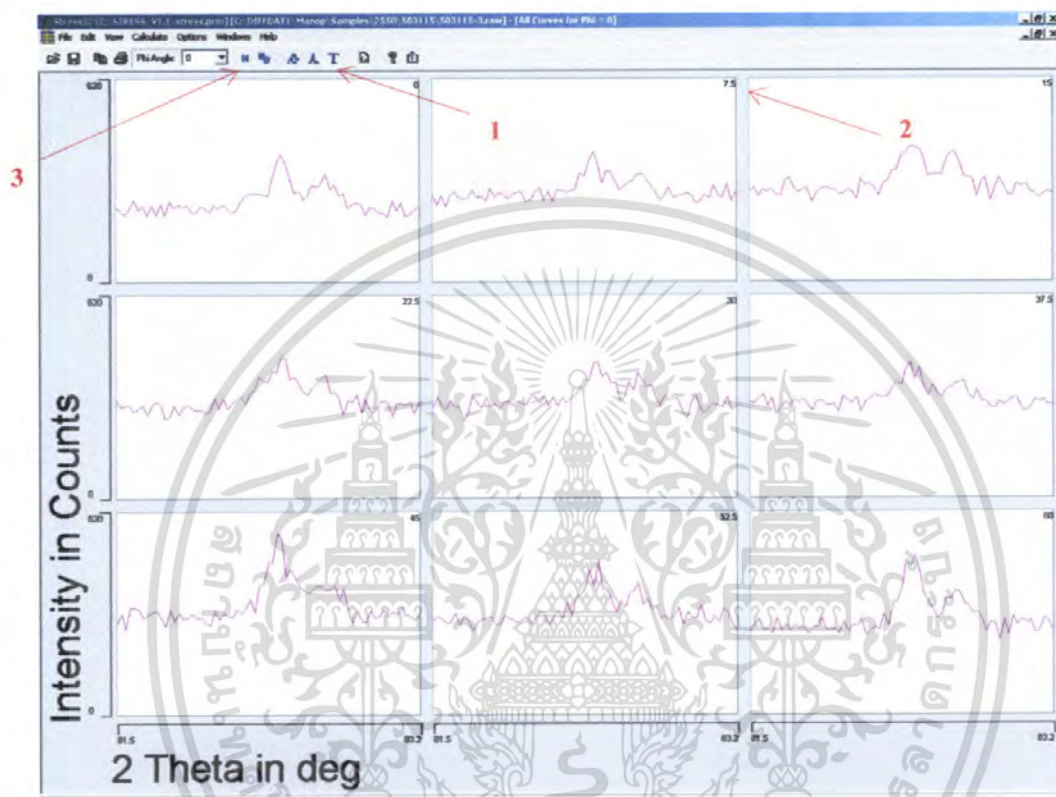
- รูปที่ 3.32 a) แสดงเมื่อเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เริ่มทำงาน
 b) แสดงการทำงานของเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เมื่อมีการหมุนแกน ψ
- 7) เมื่อเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ทำงานเสร็จแล้ว ทำการวิเคราะห์หาค่าความเค้นต่อโดยการ
 ใช้โปรแกรม STRESS ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3.33 แสดงหน้าโปรแกรม Stress

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

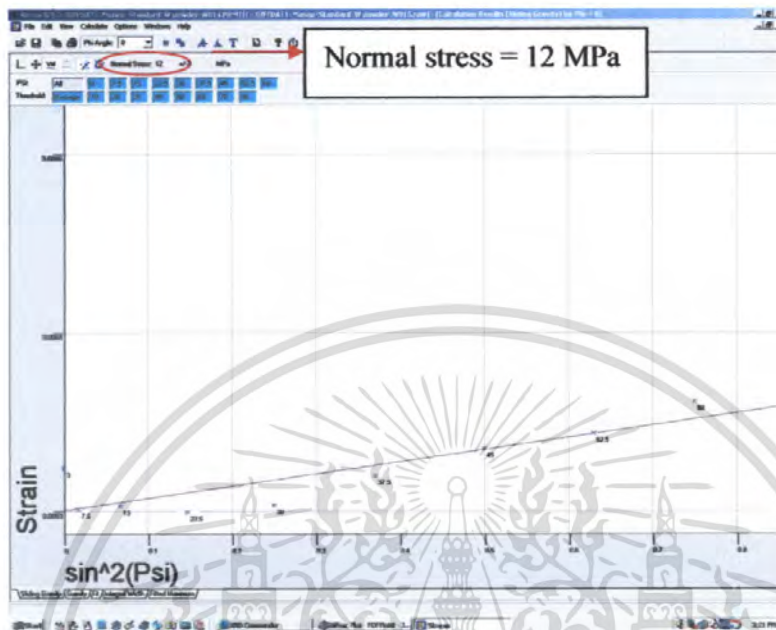
จากนั้นเปิด File ที่ได้จากการทำการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากโปรแกรม DIFFRAC plus แล้วทำการเลือกให้โปรแกรมแสดงภาพผลการเลี้ยวเบน โดยจะสามารถแสดงการเลี้ยวเบนที่ตำแหน่งแกน Psi ต่างๆ โดยจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มแสงและมุม 2θ ดังรูป



จากรูป หมายเลข 1 เมื่อกรูปรูปกราฟนี้แล้วผลการทดลองจะแสดงเป็นกราฟที่แกน Psi ต่างๆ
 หมายเลข 2 ตัวเลขกำกับที่มุมของทุกรูปกราฟแสดงถึงรูปกราฟที่แกน Psi ต่างๆ
 หมายเลข 3 เมื่อทำการกด N หมายความว่าให้นำรูปกราฟทั้งหมดนี้ไปคำนวณหาค่าความเค้น โดยโปรแกรมจะทำหน้าที่ในการคำนวณทั้งหมด ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะนำเสนอในบทถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) เมื่อกด N จะแสดงผลดังรูป



ถ้า Normal Stress ไม่อยู่ในช่วง ± 14 ให้ทำการปรับตำแหน่งของฐานวางงานใหม่อีกครั้ง แต่ถ้าอยู่ในช่วงแล้วแสดงว่าได้ทำการปรับเทียบ (Calibration) เรียบร้อยแล้วเพราะ ทั้งสองเป็นค่ามาตรฐานที่ไม่มีค่าเกิน

9) เปลี่ยนชิ้นงานเป็นเหล็กแผ่น, เหล็กท่อกลมและเหล็กท่อสี่เหลี่ยม ตามลำดับ ทำซ้ำข้อที่ 5) - 8) โดยใช้ค่ามุม 2θ ที่ได้จากข้อ ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การวิเคราะห์โดยการคำนวณ

จากสมการที่ 2.8

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1}{2}S_2\sigma_\phi \sin^2\psi + S_1[\sigma_{11} + \sigma_{22}]$$

โดย $S_1 = -\frac{\nu}{E}$, $\frac{1}{2}S_2 = \frac{\nu+1}{E}$

เมื่อ ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

E คือ ค่าขึงคัมมอดูลัส (Young's modulus)

ดังนั้นจะได้สมการใหม่ คือ

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{\nu+1}{E}\sigma_\phi \sin^2\psi - \frac{\nu}{E}[\sigma_{11} + \sigma_{22}] \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 2.3 เทียบกับ สมการที่ 3.1

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{\nu+1}{E}\sigma_\phi \sin^2\psi - \frac{\nu}{E}[\sigma_{11} + \sigma_{22}] \quad (3.2)$$

โดยที่ $d_{\phi\psi}$ คือ ระยะของระนาบที่มุม ϕ และมุม ψ

d_0 คือ ระยะของระนาบที่ไม่มีมุม

เมื่อนำสมการที่ 4.2 เทียบกับสมการเส้นตรงที่เขียนจากกราฟความสัมพันธ์ของ $\frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0}$

กับ $\sin^2\psi$

จากสมการเส้นตรง $y = mx + c$ เทียบกับ สมการที่ 3.2 จะได้

$$y = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} \quad ; \quad m = \frac{\nu+1}{E}\sigma_\phi \quad ; \quad x = \sin^2\psi$$

โดยที่หา $d_{\phi\psi}$ จากสมการแบรกก์

$$\begin{aligned} n\lambda &= 2d_{\phi\psi} \sin\theta_{\phi\psi} \\ d_{\phi\psi} &= \frac{\lambda}{2\sin\theta_{\phi\psi}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และหา d_0 จากสมการแบรกก์เช่นกันแต่จะได้มุม θ จากเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์
พิจารณาหาค่าความเค้น (σ_ϕ) จากความชันของกราฟ

$$m = \frac{\nu+1}{E} \sigma_\phi$$

$$\sigma_\phi = \frac{E}{\nu+1} m \quad (3.4)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การเปรียบเทียบของระบบการวัด

เลือกใช้สารมาตรฐาน คือ ทังสเทน

ค่าศักย์ไฟฟ้า (HV)	:	40 kV
ค่ากระแสไฟฟ้า (I)	:	40 mA
Young 's modulus	:	411 GPa
Poisson ratio	:	0.28
หลอดรังสีเอ็กซ์ มีความยาวคลื่น (λ)	:	1.54060Å

d_0 ของทังสเทน;

เมื่อ $2\theta = 131.25$

จากสมการที่ 3.3

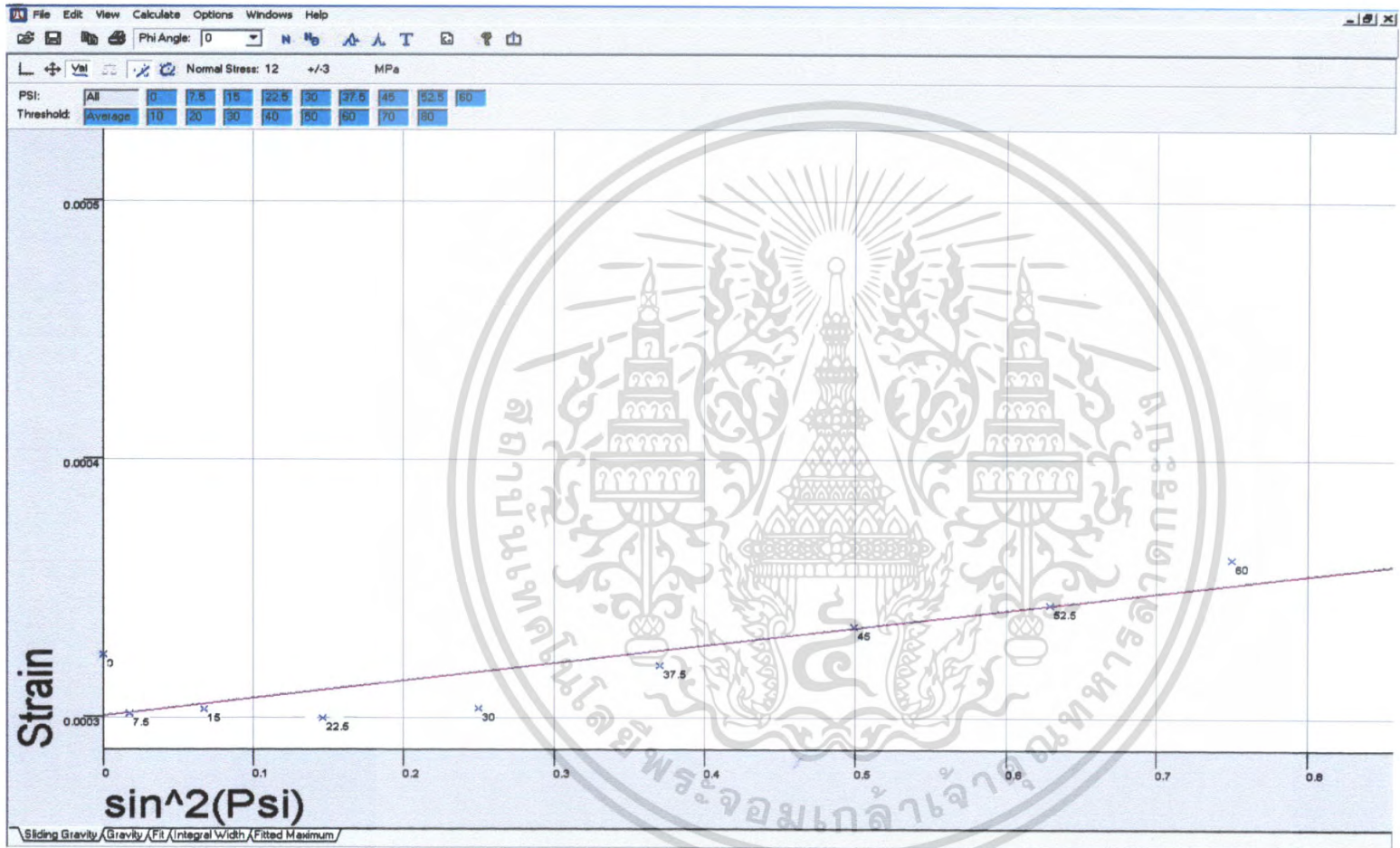
$$d_0 = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$d_0 = \frac{1.54060}{2 \sin \left(\frac{131.25}{2} \right)}$$

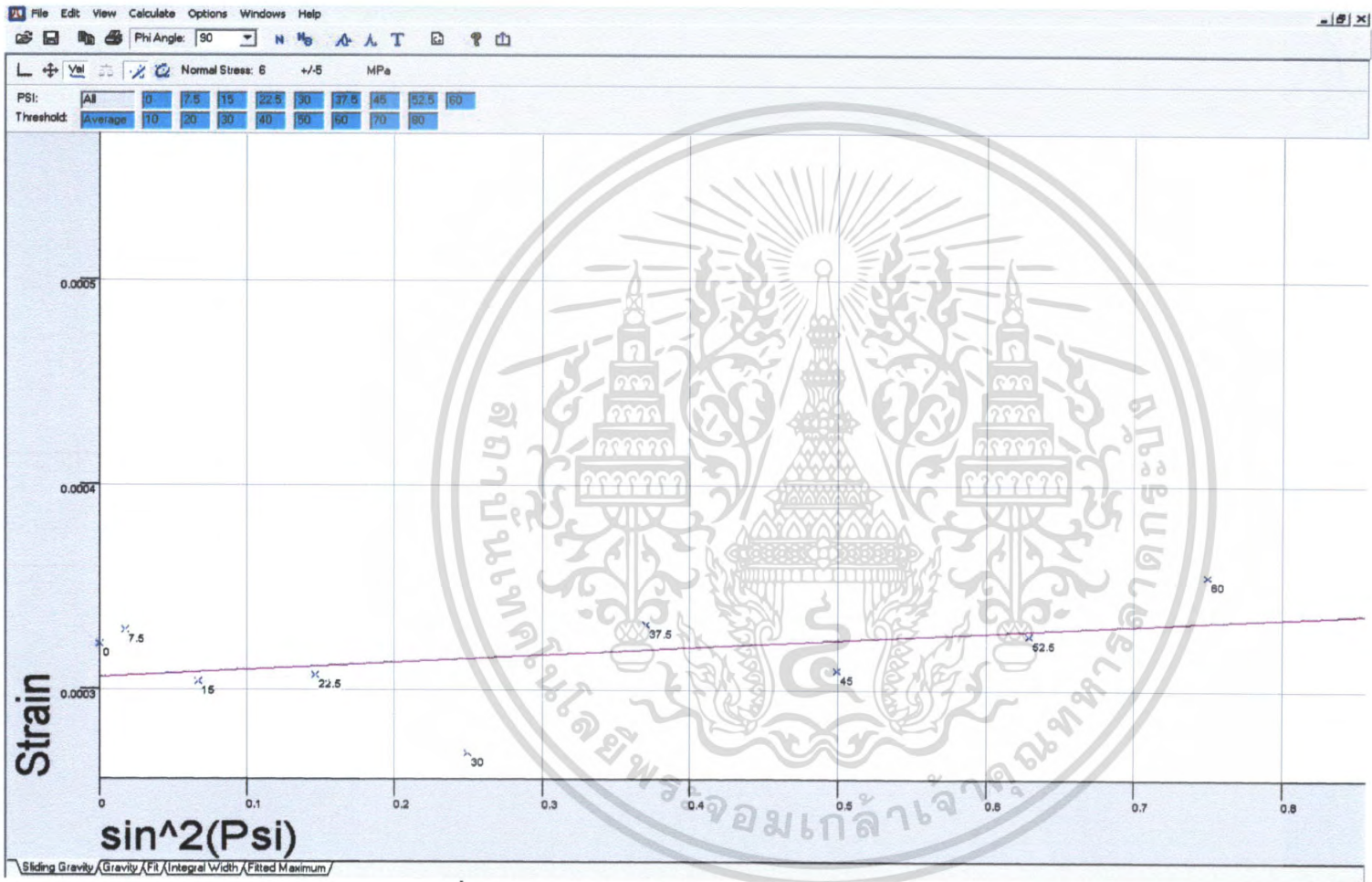
$$d_0 = 0.84568$$

4.1.1 ผลการวัดความเค้นค้ำโดยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

- ทังสเทน วัดที่มุม $\varphi = 0^\circ$ ผลแสดงดังรูปที่ 4.1
- ทังสเทน วัดที่มุม $\varphi = 90^\circ$ ผลแสดงดังรูปที่ 4.2



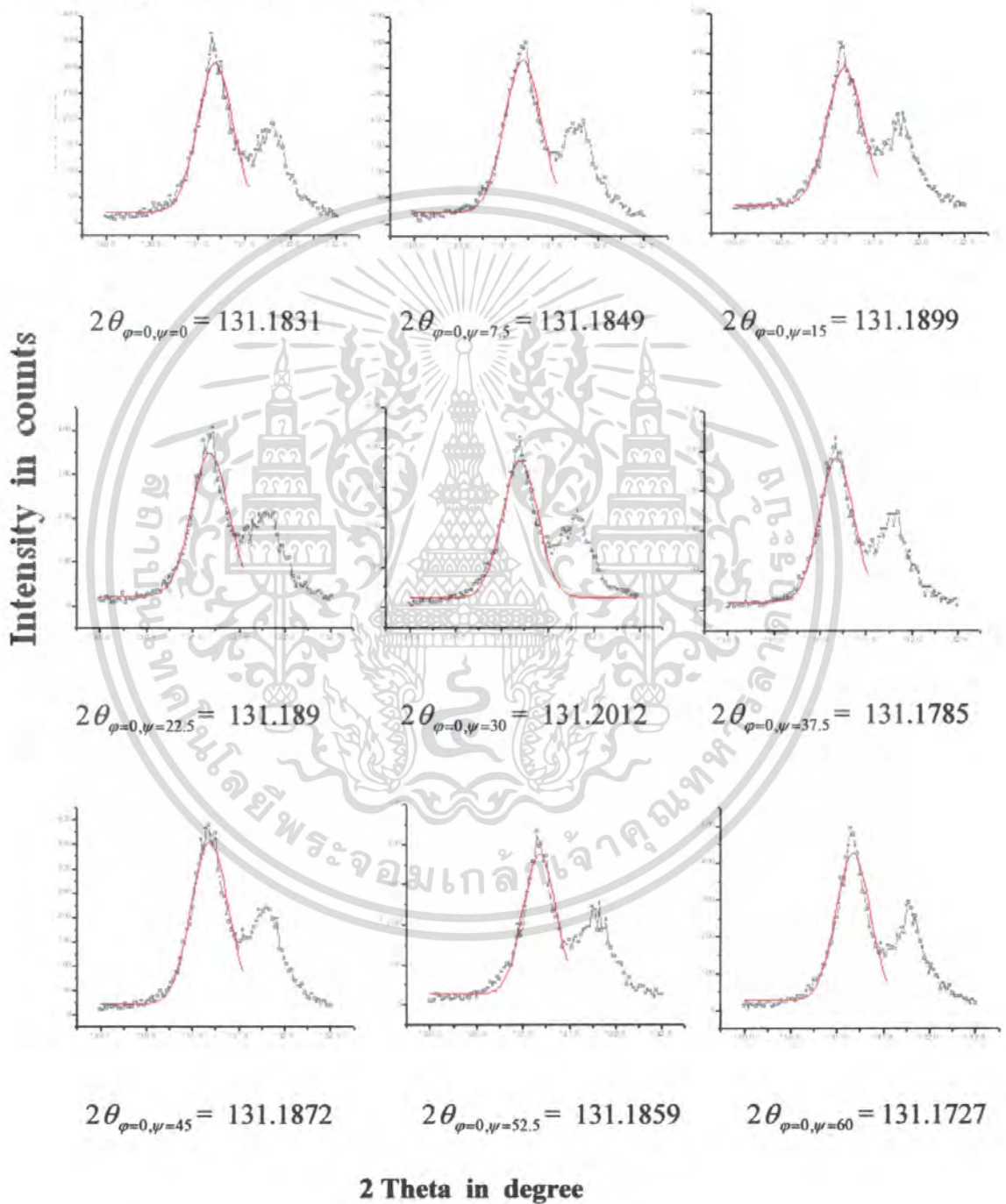
รูปที่ 4.1 แสดงผลความเค้นของทั้งสแตนที่มุม $\varphi = 0^\circ$



รูปที่ 4.2 แสดงผลความเค้นของทั้งสแตน ที่มุม $\phi = 90^\circ$

4.1.2 การวิเคราะห์โดยการคำนวณของทั้งสแกน

ก. พิจารณาที่ $\varphi = 0^\circ$ จากรูปที่ 4.3 จะได้ว่าค่าของมุม 2θ ที่แกน Psi (ψ) ต่างๆ และสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า $d_{\varphi\psi}$ และ $\sin^2\psi$ ดังตารางที่ 4.1



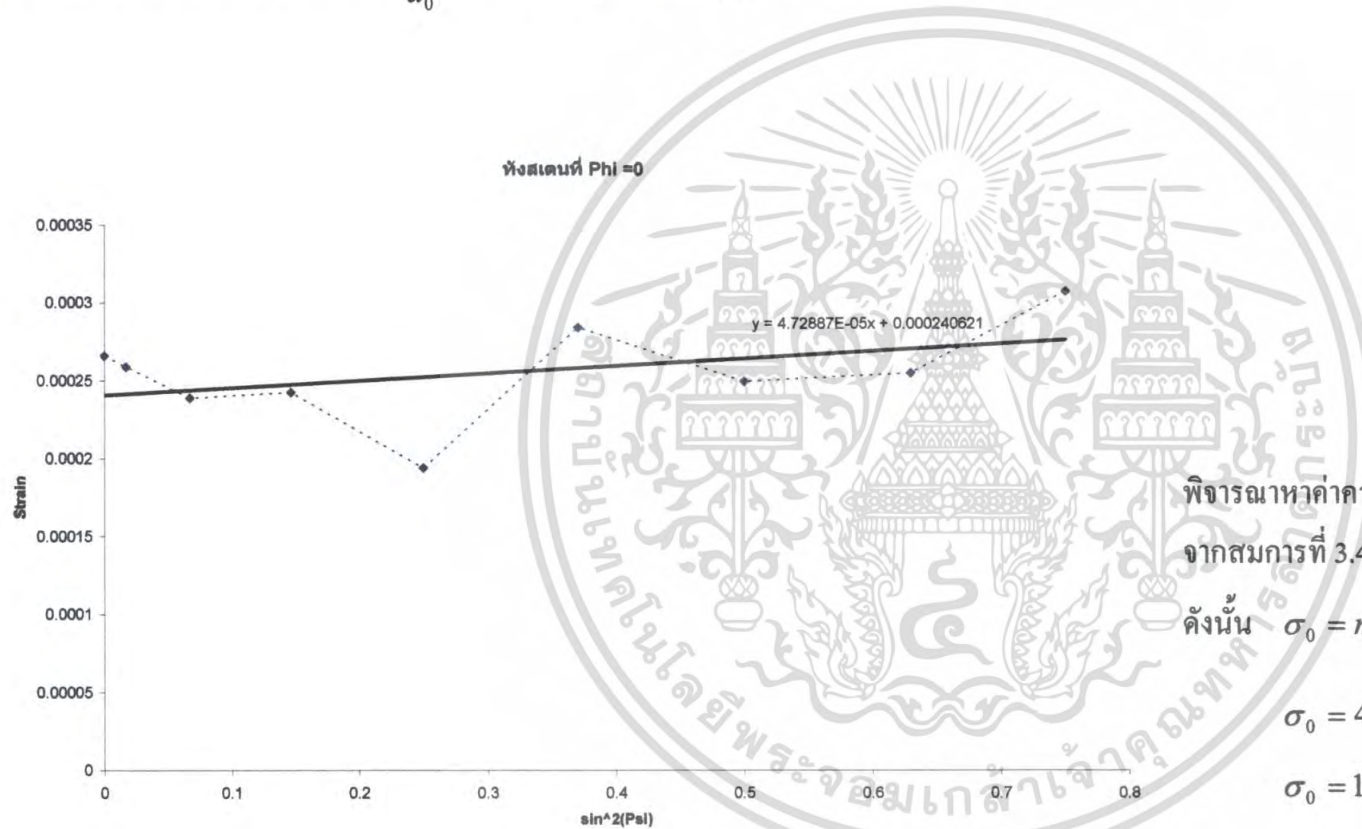
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน $\varphi = 0^\circ$ ในมุม ψ ต่างๆของทั้งสแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงการหาค่า d_{ψ} และ $\sin^2 \psi$ ของทั้งสแตนเมื่อพิจารณาที่ $\Phi (\varphi) = 0^\circ$

Psi (ψ)	$2\theta_{\psi}$	θ_{ψ}	$\sin \theta_{\psi}$	$2\sin \theta_{\psi}$	$d_{\psi} = \frac{\lambda}{2\sin \theta}$	$\varepsilon = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$	$\sin^2 \psi$
0	131.1831	65.59153	0.910622546	1.821245092	0.845904819	0.000265844	0
7.5	131.1849	65.59243	0.910629073	1.821258146	0.845898756	0.000258675	0.017037
15	131.1899	65.59494	0.910647174	1.821294349	0.845881942	0.000238792	0.066987
22.5	131.189	65.59448	0.910643857	1.821287714	0.845885023	0.000242436	0.146447
30	131.2012	65.6006	0.910687987	1.821375974	0.845844034	0.000193966	0.25
37.5	131.1785	65.58923	0.910605993	1.821211985	0.845920196	0.000284027	0.37059
45	131.1872	65.59362	0.910637619	1.821275238	0.845890817	0.000249287	0.5
52.5	131.1859	65.59294	0.910632751	1.821265502	0.845895339	0.000254635	0.62941
60	131.1727	65.58633	0.910585038	1.821170075	0.845939663	0.000307047	0.75

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$ กับ $\sin^2 \psi$ ที่ $\Phi (\varphi) = 0^\circ$



พิจารณาค่าความเค้น (σ_ϕ) จากความชันของกราฟ จากสมการที่ 3.4

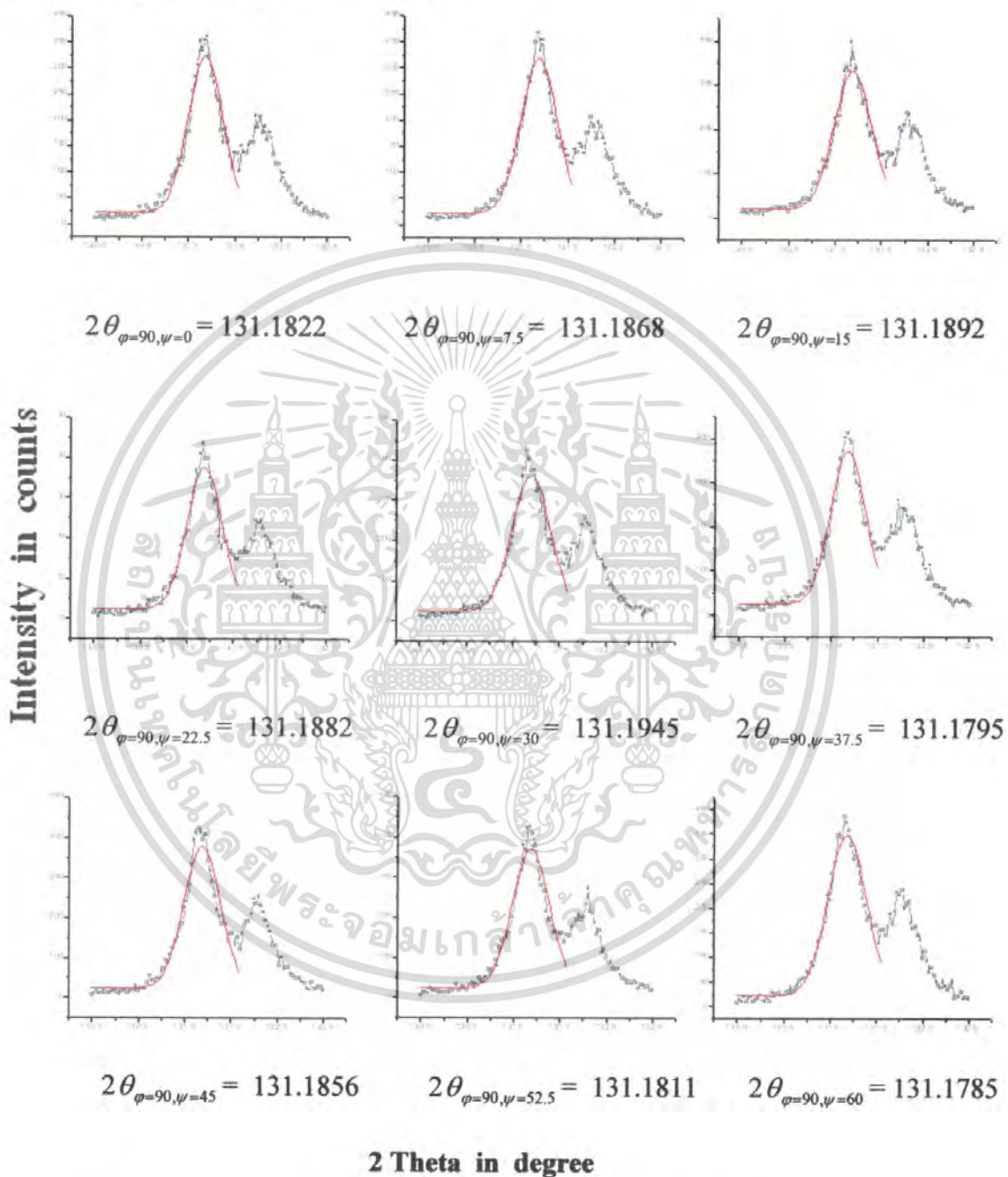
ดังนั้น
$$\sigma_0 = m \cdot \left(\frac{E}{\nu + 1} \right)$$

$$\sigma_0 = 4.72887 \times 10^{-5} \left(\frac{411 \text{ GPa}}{0.28 + 1} \right)$$

$$\sigma_0 = 14.71 \text{ MPa}$$

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดกับ $\sin^2 \psi$ ของทั้งสแตนท์ที่ $\varphi = 0^\circ$

ข. พิจารณาที่ $\varphi = 90^\circ$ จากรูปที่ 4.5 จะได้ค่าของมุม 2θ ที่แกน Psi (ψ) ต่างๆ และสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า $d_{\varphi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ดังตารางที่ 4.2



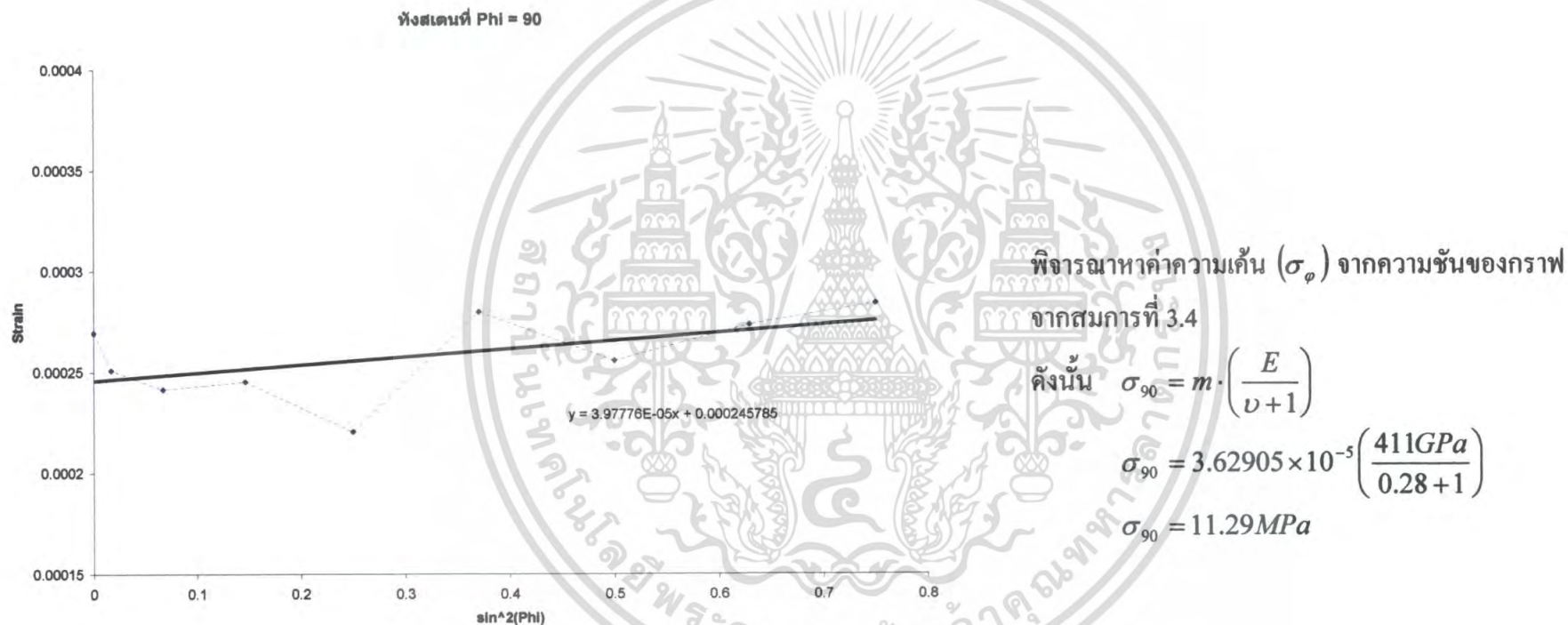
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน $\varphi = 90^\circ$ ในมุม ψ ต่างๆของทั้งสแตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงการหาค่า $d_{\varphi\psi}$ และ $\sin^2\psi$ ของทั้งสแตนเมื่อพิจารณาที่ $\Phi (\varphi) = 90^\circ$

Psi (ψ)	$2\theta_{\varphi\psi}$	$\theta_{\varphi\psi}$	$\sin \theta_{\varphi\psi}$	$2\sin \theta_{\varphi\psi}$	$d_{\varphi\psi} = \frac{\lambda}{2\sin \theta}$	$\varepsilon = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0}$	$\sin^2\psi$
0	131.1822	65.59108	0.910619336	1.821238673	0.845907801	0.00026937	0
7.5	131.1868	65.59341	0.910636141	1.821272281	0.845892191	0.000250911	0.017037
15	131.1892	65.5946	0.910644723	1.821289445	0.845884219	0.000241485	0.066987
22.5	131.1882	65.59412	0.910641225	1.82128245	0.845887468	0.000245327	0.146447
30	131.1945	65.59723	0.910663688	1.821327376	0.845866603	0.000220654	0.25
37.5	131.1795	65.58976	0.910609779	1.821219559	0.845916678	0.000279868	0.37059
45	131.1856	65.59282	0.910631886	1.821263771	0.845896143	0.000255585	0.5
52.5	131.1811	65.59056	0.910615586	1.821231171	0.845911285	0.00027349	0.62941
60	131.1785	65.58924	0.910606029	1.821212057	0.845920163	0.000283988	0.75

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$ กับ $\sin^2 \psi$ ที่ Phi (φ) = 90°



รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดกับ $\sin^2 \psi$ ของทั้งสแกนที่ $\varphi = 90^\circ$

4.2 การวัดและวิเคราะห์เหล็กแผ่น,เหล็กทอกลมและเหล็กท่อสี่เหลี่ยม

ค่าศักย์ไฟฟ้า (HV)	:	40 kV
ค่ากระแสไฟฟ้า (I)	:	40 mA
Young 's modulus	:	220 GPa
Poisson ratio	:	0.28
หลอดรังสีเอ็กซ์ มีความยาวคลื่น (λ)	:	1.54060 Å

d_0 ของเหล็กแอลฟา

เมื่อ $2\theta = 82.3785558$

จากสมการที่ 4.3

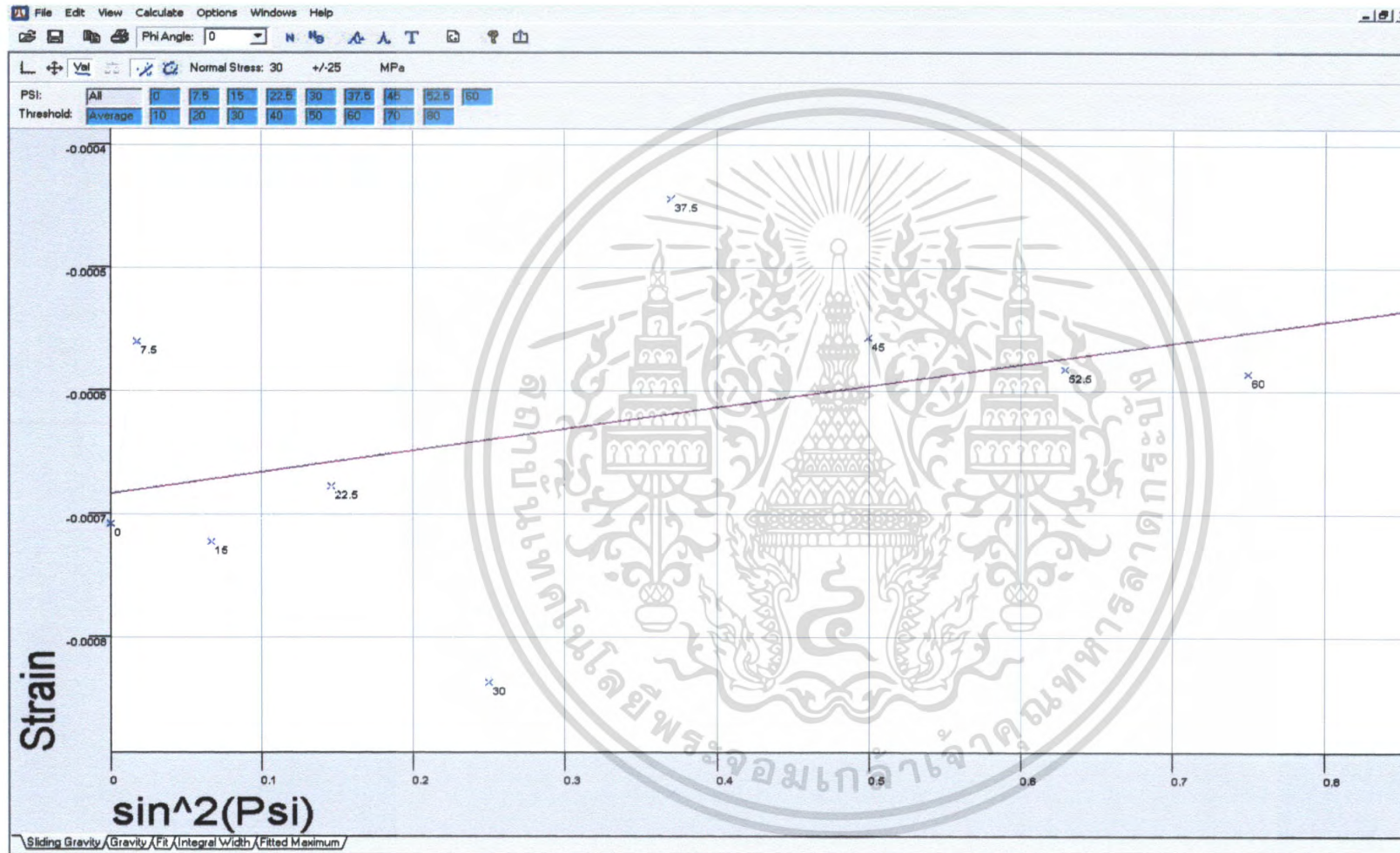
$$d_0 = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

$$d_0 = \frac{1.54060}{2 \sin \left(\frac{82.3785558}{2} \right)}$$

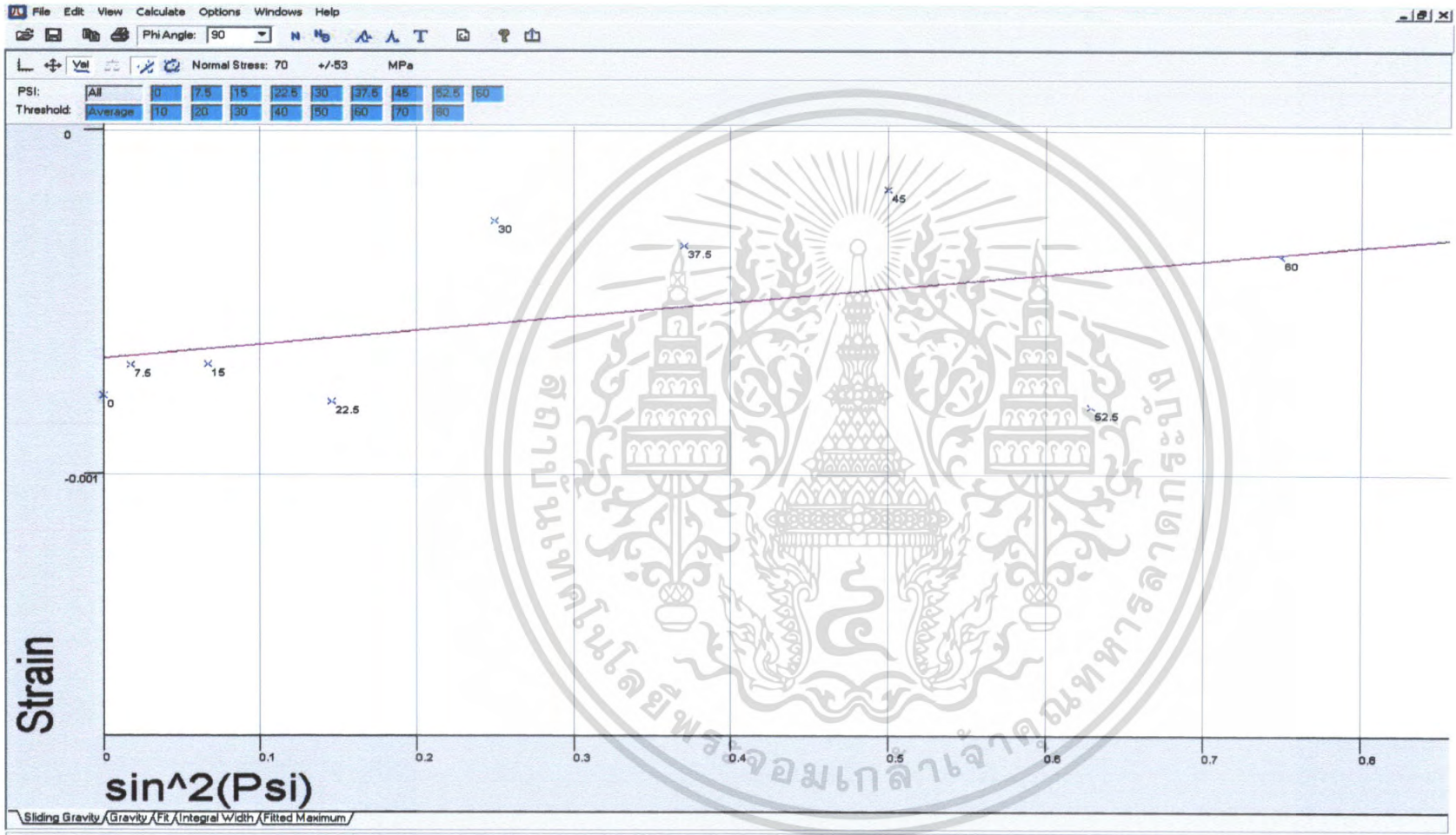
$$d_0 = 1.169693395$$

4.2.1 ผลการวัดความเค้นคงค้าง โดยเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

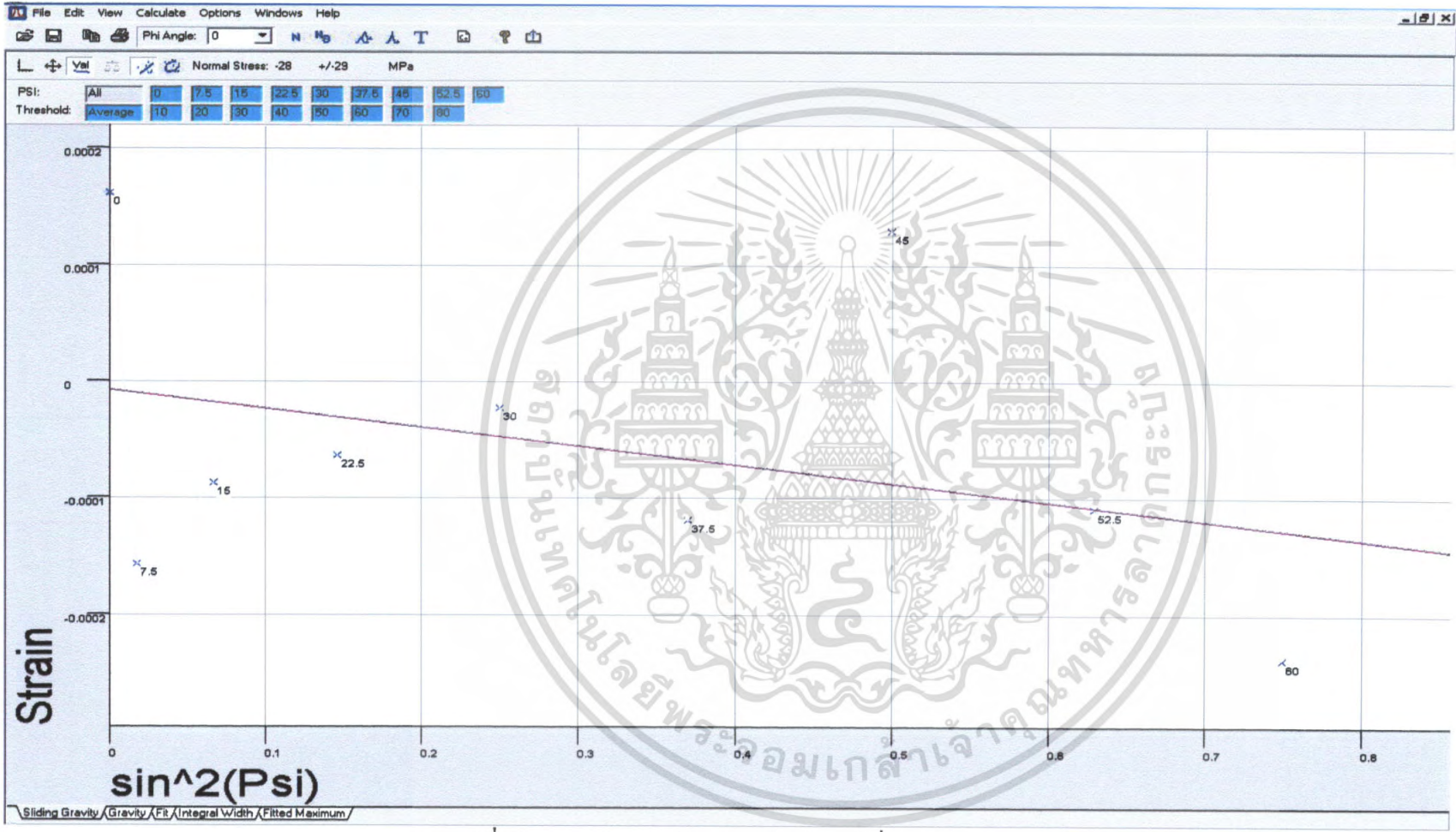
- เหล็กแผ่น	วัดที่มุม $\varphi = 0^\circ$	ผลแสดงดังรูปที่ 4.7
- เหล็กแผ่น	วัดที่มุม $\varphi = 90^\circ$	ผลแสดงดังรูปที่ 4.8
- เหล็กทอกลม	วัดที่มุม $\varphi = 0^\circ$	ผลแสดงดังรูปที่ 4.9
- เหล็กทอกลม	วัดที่มุม $\varphi = 90^\circ$	ผลแสดงดังรูปที่ 4.10
- เหล็กท่อสี่เหลี่ยม	วัดที่มุม $\varphi = 0^\circ$	ผลแสดงดังรูปที่ 4.11
- เหล็กท่อสี่เหลี่ยม	วัดที่มุม $\varphi = 90^\circ$	ผลแสดงดังรูปที่ 4.12



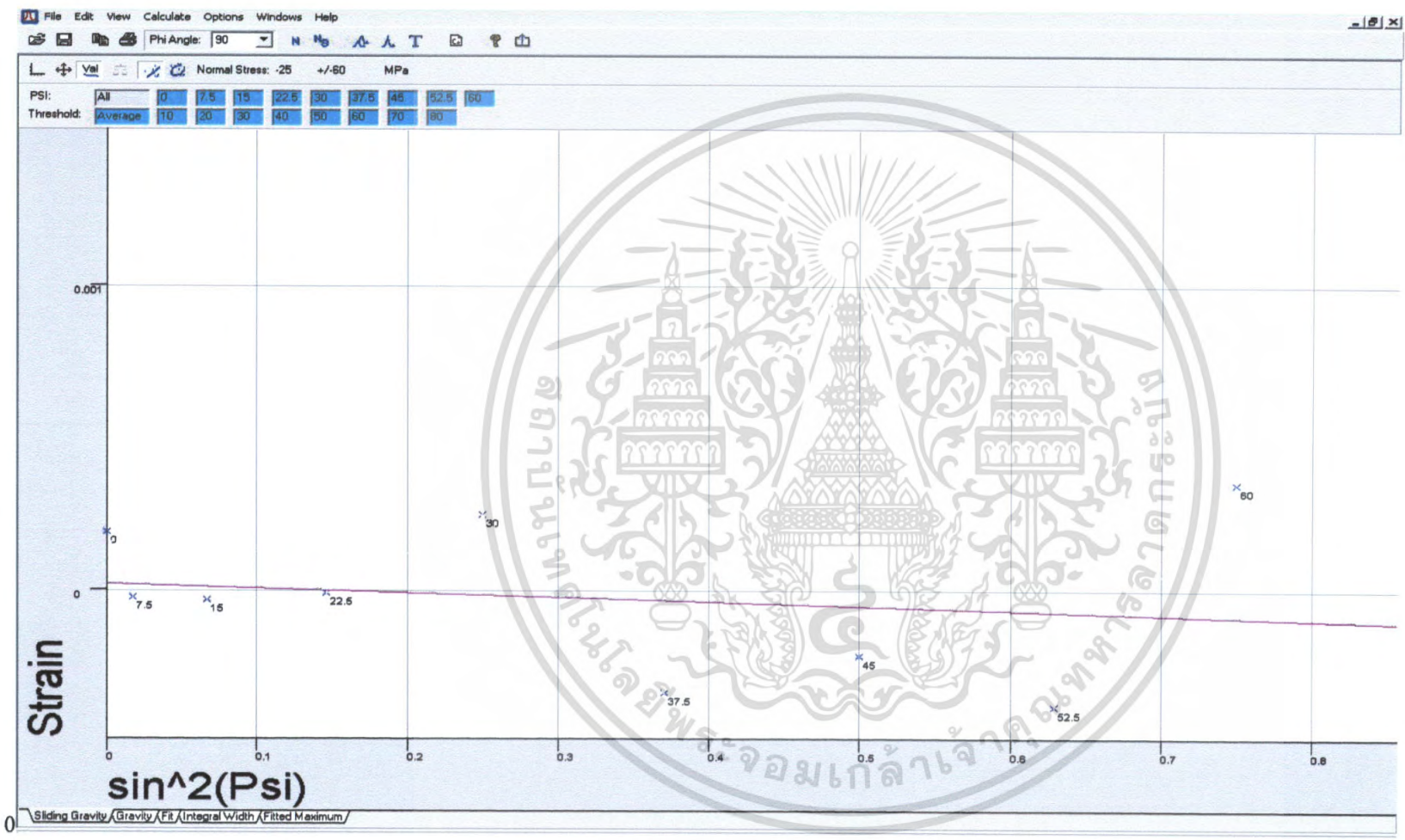
รูปที่ 4.7 แสดงผลความเค้นของเหล็กแผ่นที่มุม $\phi = 0^\circ$



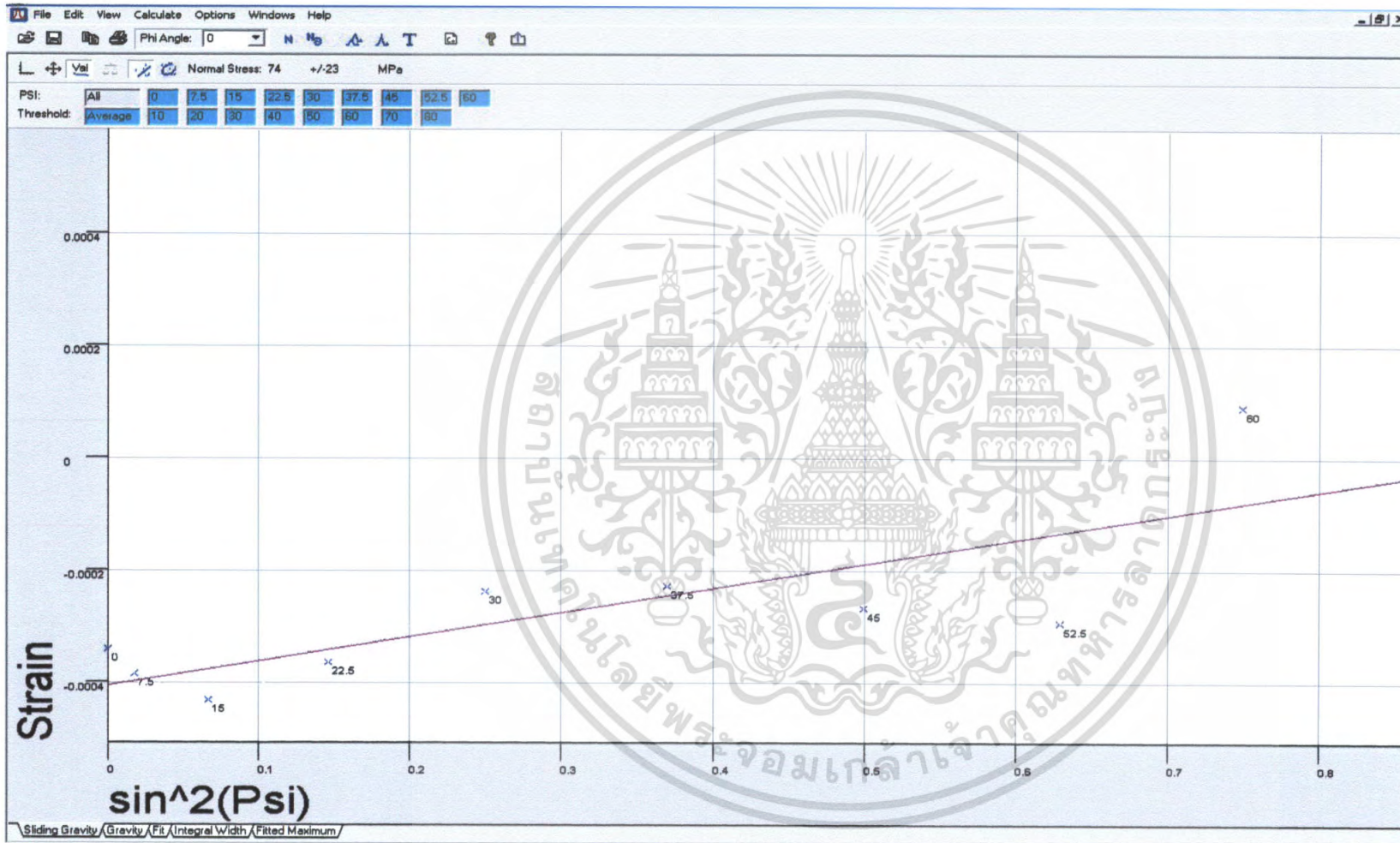
รูปที่ 4.8 แสดงผลความเค้นของเหล็กแผ่น ที่มุม $\varphi = 90^\circ$



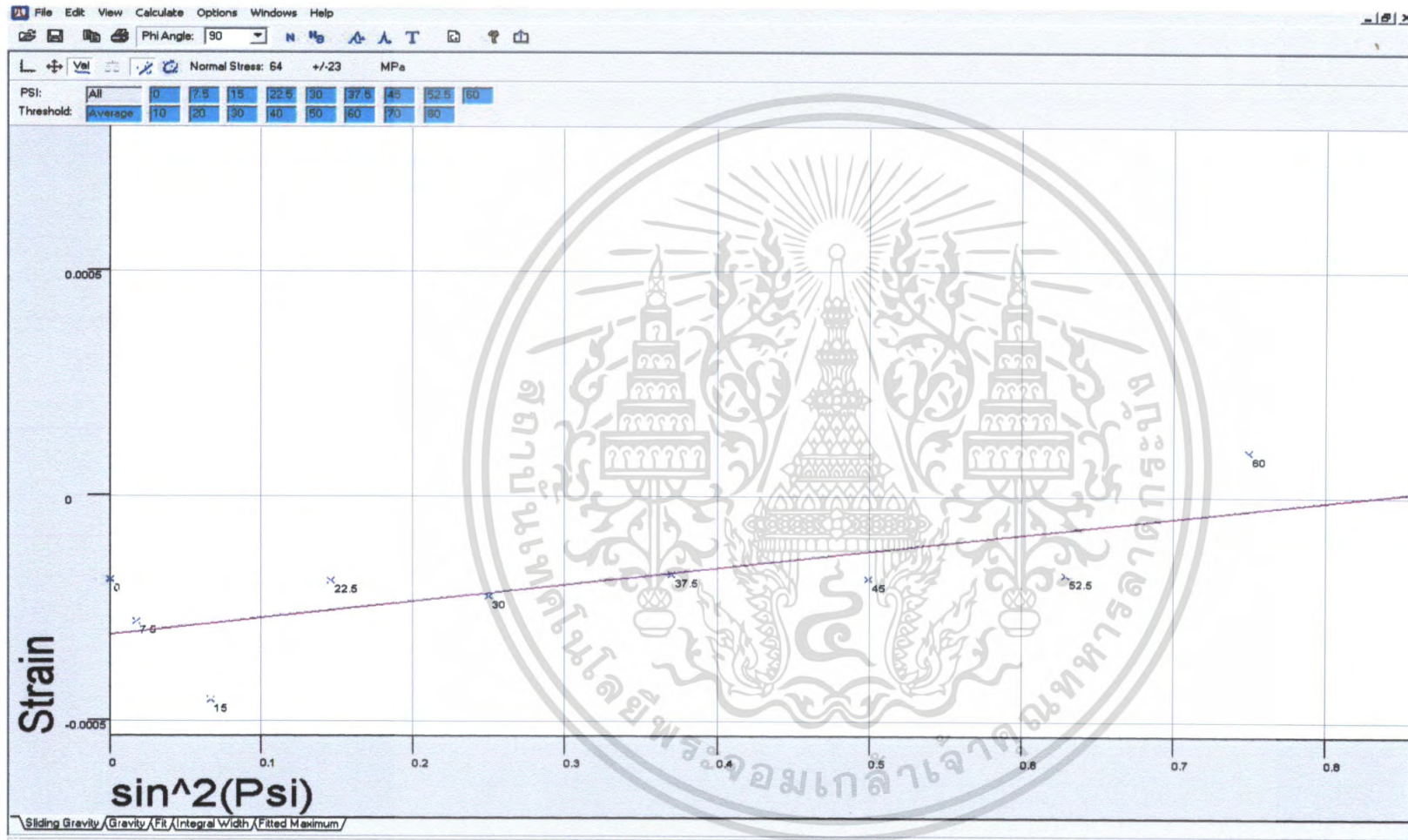
รูปที่ 4.9 แสดงผลความเค้นของเหล็กท่อกลม ที่มุม $\varphi = 0^\circ$



รูปที่ 4.10 แสดงผลของเหล็กท่อกลม ที่มุม $\varphi = 90^\circ$



รูปที่ 4.11 แสดงผลของเหล็กทอสีเหลี่ยม ที่มุม $\phi = 0^\circ$

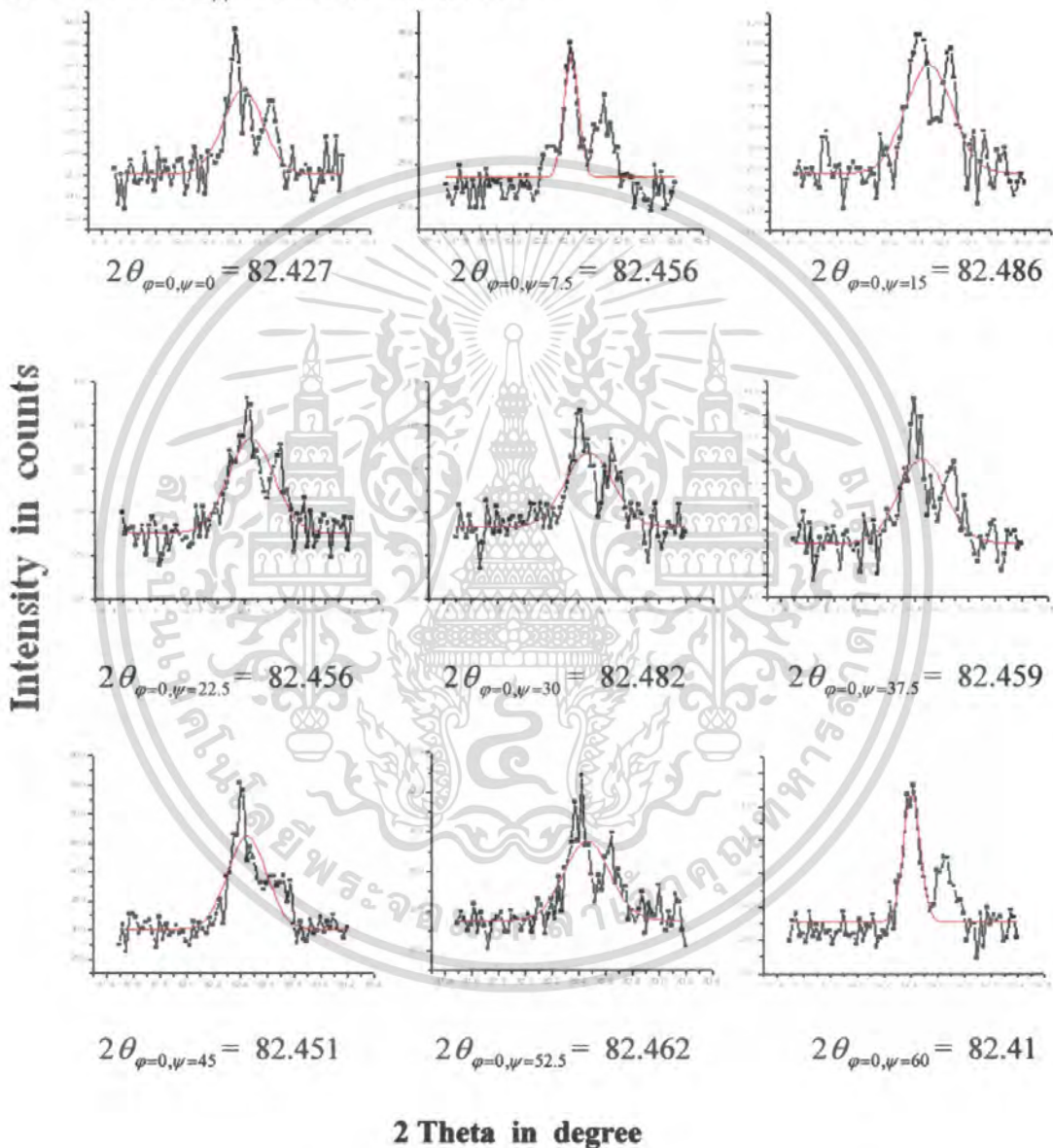


รูปที่ 4.12 แสดงผลของเหล็กท่อสี่เหลี่ยม ที่มุม $\varphi = 90^\circ$

4.2.2 การวิเคราะห์โดยการคำนวณของเหล็กแผ่น, เหล็กท่อกลม และ เหล็กท่อสี่เหลี่ยม

1) วิเคราะห์เหล็กแผ่น

ก.พิจารณาที่ $\varphi = 0^\circ$ จากรูปที่ 4.13 จะได้ค่าของมุม 2θ ที่แกน Psi (ψ) ต่างๆ และสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า $d_{\varphi\psi}$ และ $\sin^2\psi$ ดังตารางที่ 4.3



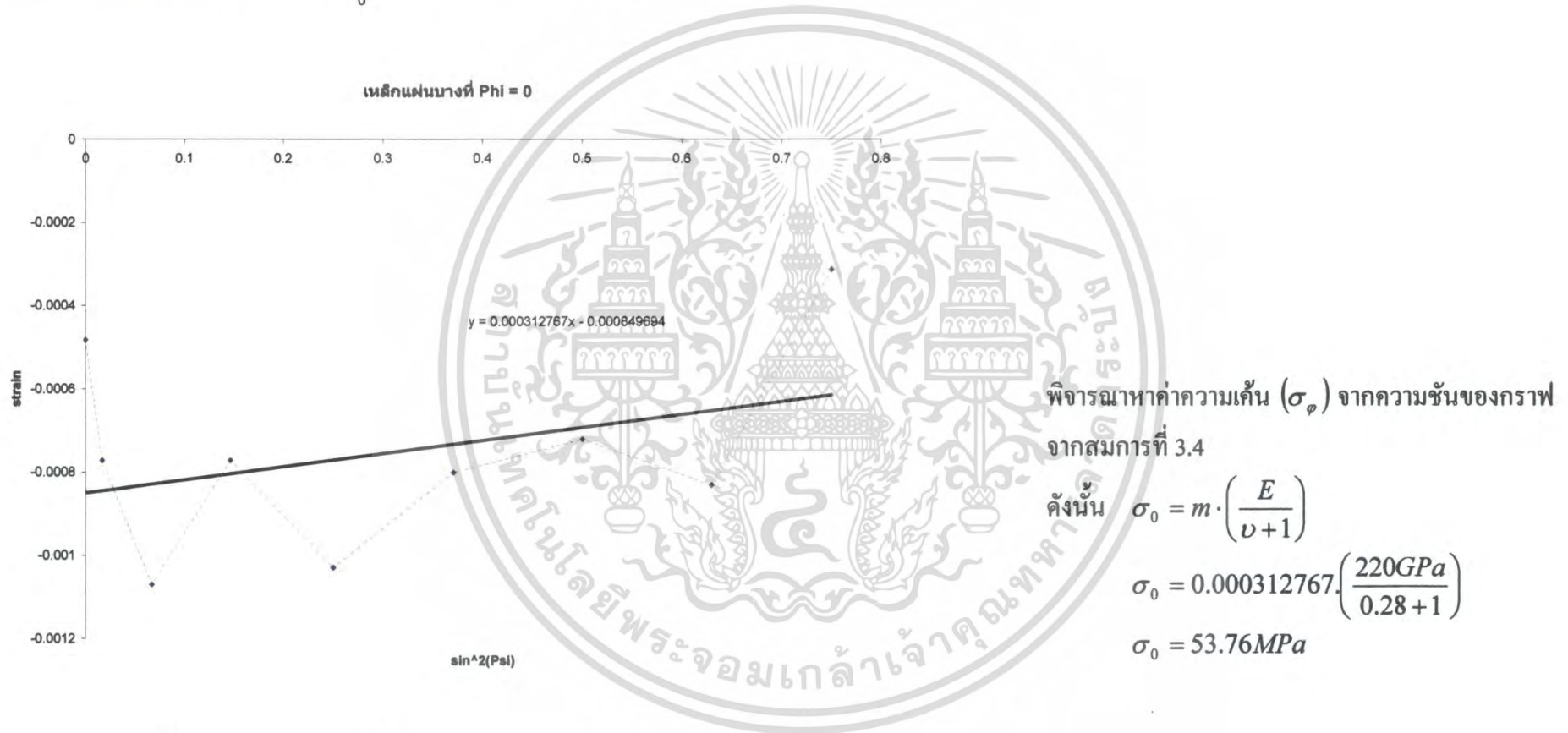
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน $\varphi = 0^\circ$ ในมุม ψ ต่างๆ ของเหล็กแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงการหาค่า d_{ψ} และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กแผ่นเมื่อพิจารณาที่ $\Phi (\phi) = 0^\circ$

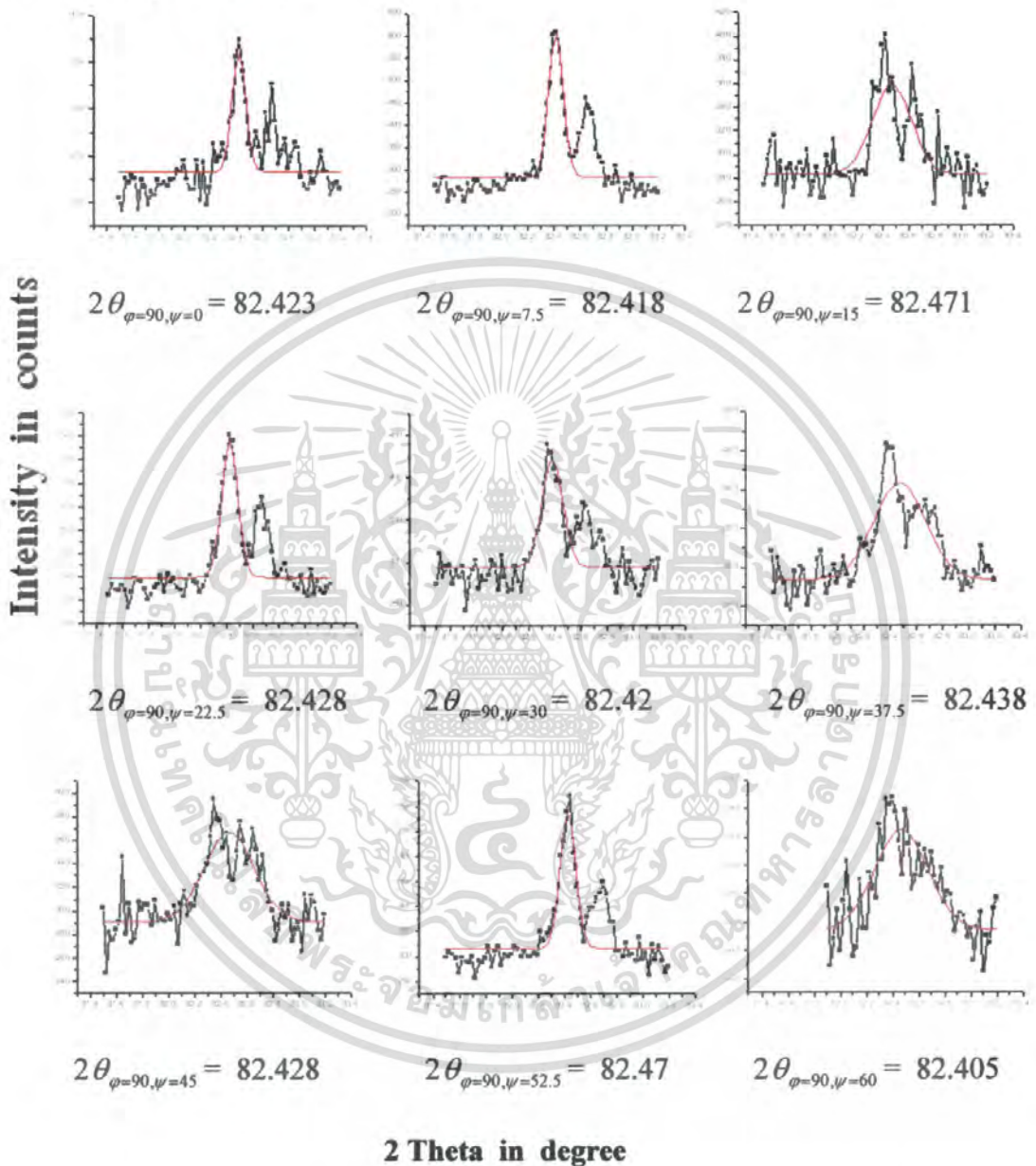
Psi (ψ)	$2\theta_{\psi}$	θ_{ψ}	$\sin \theta_{\psi}$	$2\sin \theta_{\psi}$	$d_{\psi} = \frac{\lambda}{2\sin \theta}$	$\varepsilon = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$	$\sin^2 \psi$
0	82.427	41.2135	0.658866725	1.317733451	1.169128703	-0.000482769	0
7.5	82.456	41.228	0.659057081	1.318114161	1.168791024	-0.00077146	0.017037
15	82.486	41.243	0.659253956	1.318507911	1.168441984	-0.001069862	0.066987
22.5	82.456	41.228	0.659057081	1.318114161	1.168791024	-0.00077146	0.146447
30	82.482	41.241	0.659227708	1.318455416	1.168488506	-0.001030089	0.25
37.5	82.459	41.2295	0.65907677	1.318153541	1.168756107	-0.000801311	0.37059
45	82.451	41.2255	0.659024264	1.318048528	1.168849225	-0.000721702	0.5
52.5	82.462	41.231	0.659096459	1.318192919	1.168721193	-0.00083116	0.62941
60	82.41	41.205	0.658755118	1.317510236	1.169326778	-0.00031343	0.75

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$ กับ $\sin^2 \psi$ ที่ $\text{Phi} (\varphi) = 0^\circ$



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กแผ่น ที่ $\varphi = 0^\circ$

ข. พิจารณาที่ $\varphi = 90^\circ$ จากรูปที่ 4.14 จะได้ว่าค่าของมุม 2θ ที่แกน Psi (ψ) ต่างๆ และสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า $d_{\varphi\psi}$ และ $\sin^2\psi$ ดังตารางที่ 4.4



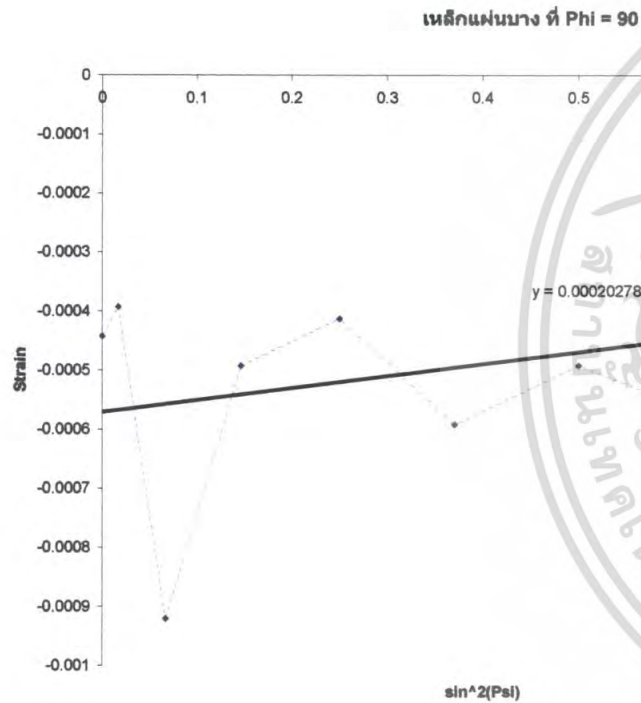
รูปที่ 4.15 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน $\varphi = 90^\circ$ ในมุม ψ ต่างๆของเหล็กแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงการหาค่า d_{ψ} และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กแผ่นเมื่อพิจารณาที่ $\Phi (\varphi) = 90^\circ$

Psi (ψ)	$2\theta_{\psi}$	θ_{ψ}	$\sin \theta_{\psi}$	$2\sin \theta_{\psi}$	$d_{\psi} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$	$\varepsilon = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$	$\sin^2 \psi$
0	82.423	41.2115	0.658840466	1.317680932	1.1691753	-0.000442932	0
7.5	82.418	41.209	0.658807641	1.317615282	1.169233555	-0.000393129	0.017037
15	82.471	41.2355	0.659155524	1.318311048	1.168616468	-0.000920692	0.066987
22.5	82.428	41.214	0.65887329	1.31774658	1.169117054	-0.000492728	0.146447
30	82.42	41.21	0.658820771	1.317641543	1.169210252	-0.000413051	0.25
37.5	82.438	41.219	0.658938934	1.317877868	1.169000586	-0.0005923	0.37059
45	82.428	41.214	0.65887329	1.31774658	1.169117054	-0.000492728	0.5
52.5	82.47	41.235	0.658925806	1.317851611	1.169023877	-0.000572388	0.62941
60	82.405	41.2025	0.65872229	1.31744458	1.169385053	-0.000263609	0.75

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$ กับ $\sin^2 \psi$ ที่ $\Phi (\varphi) = 90^\circ$



พิจารณาค่าความเค้น (σ_{φ}) จากความชันของกราฟ จากสมการที่ 3.4

$$\text{ดังนั้น } \sigma_{90} = m \cdot \left(\frac{E}{\nu + 1} \right)$$

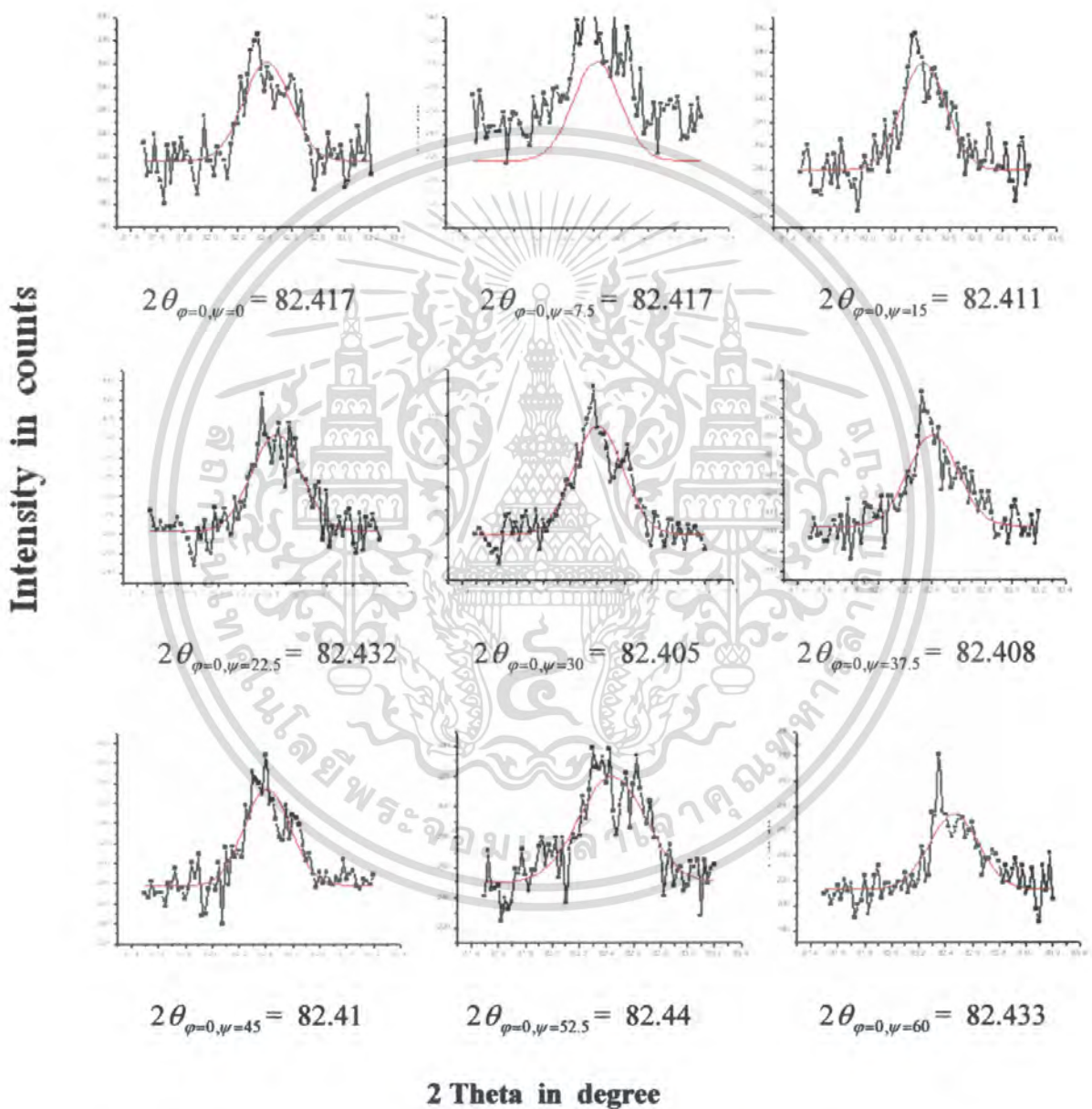
$$\sigma_{90} = 0.000202783 \cdot \left(\frac{220 \text{ GPa}}{0.28 + 1} \right)$$

$$\sigma_{90} = 34.85 \text{ MPa}$$

รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กแผ่น ที่ $\varphi = 90^\circ$

2) วิเคราะห์เหล็กท่อกลม

ก.พิจารณาที่ $\varphi = 0^\circ$ จากรูปที่ 4.17 จะได้ค่าของมุม 2θ ที่แกน Psi (ψ) ต่างๆ และสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า $d_{\varphi\psi}$ และ $\sin^2\psi$ ดังตารางที่ 4.5



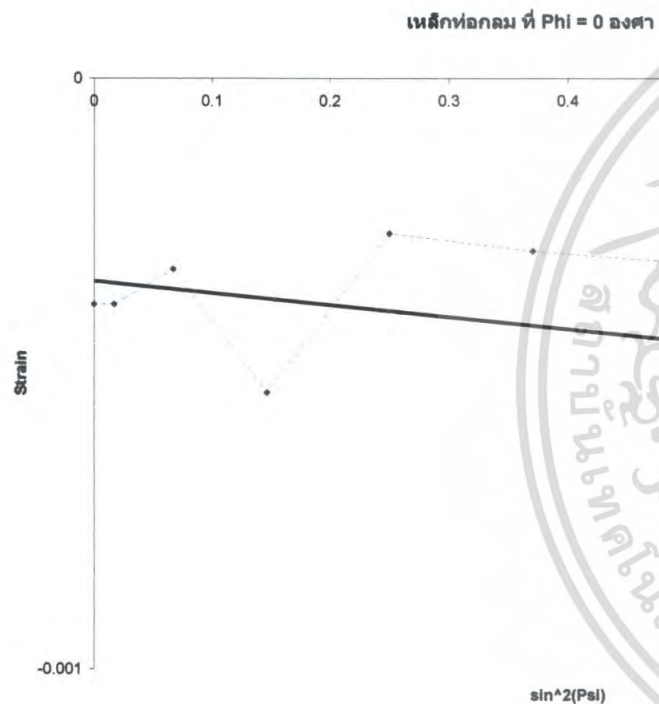
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน $\varphi = 0^\circ$ ในมุม ψ ต่างๆของเหล็กท่อกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงการหาค่า d_{ψ} และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กที่กลมเมื่อพิจารณาที่ $\text{Phi} (\varphi) = 0^\circ$

Psi (ψ)	$2\theta_{\psi}$	θ_{ψ}	$\sin \theta_{\psi}$	$2\sin \theta_{\psi}$	$d_{\psi} = \frac{\lambda}{2\sin \theta}$	$\varepsilon = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$	$\sin^2 \psi$
0	82.417	41.2085	0.658801076	1.317602152	1.169245207	-0.000383168	0
7.5	82.417	41.2085	0.658801076	1.317602152	1.169245207	-0.000383168	0.017037
15	82.411	41.2055	0.658761684	1.317523367	1.169315124	-0.000323393	0.066987
22.5	82.432	41.216	0.658899548	1.317799097	1.169070463	-0.00053256	0.146447
30	82.405	41.2025	0.658722229	1.31744458	1.169385053	-0.000263609	0.25
37.5	82.408	41.204	0.658741987	1.317483974	1.169350087	-0.000293502	0.37059
45	82.41	41.205	0.658755118	1.317510236	1.169326778	-0.00031343	0.5
52.5	82.44	41.22	0.658952062	1.317904125	1.168977296	-0.000612211	0.62941
60	82.4332	41.2166	0.658907426	1.317814851	1.169056487	-0.000544509	0.75

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0}$ กับ $\sin^2\psi$ ที่ $\Phi (\varphi) = 0^\circ$



พิจารณาค่าความเค้น (σ_ϕ) จากความชันของกราฟ
จากสมการที่ 3.4

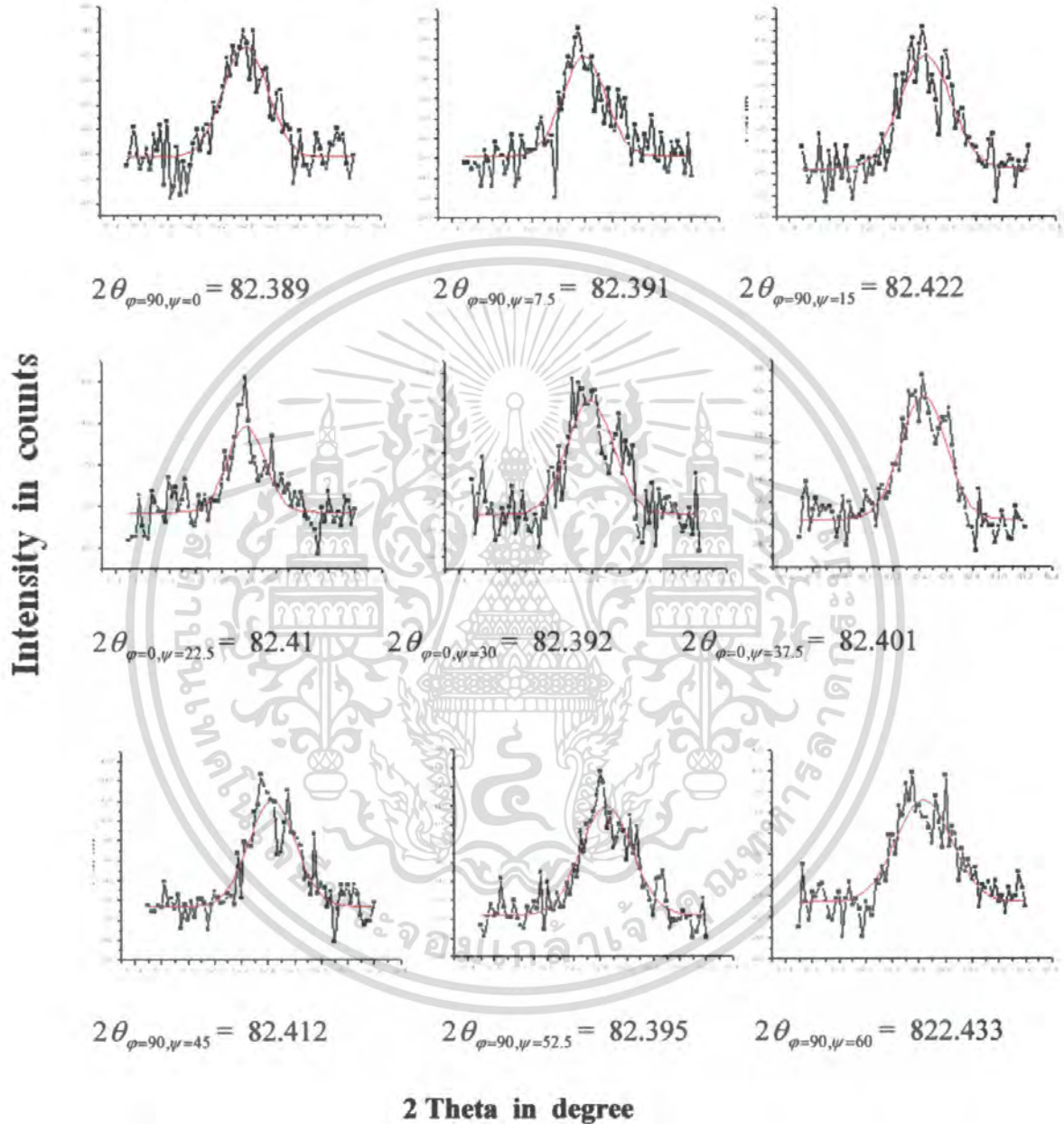
ดังนั้น
$$\sigma_0 = m \cdot \left(\frac{E}{\nu + 1} \right)$$

$$\sigma_0 = -0.00020461 \cdot \left(\frac{220\text{GPa}}{0.28 + 1} \right)$$

$$\sigma_0 = -34.49\text{MPa}$$

รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดกับ $\sin^2\psi$ ของเหล็กท่อกลมที่ $\varphi = 0^\circ$

ข. พิจารณาที่ $\varphi = 90^\circ$ จากรูปที่ 4.19 จะได้อ่าของมุม 2θ ที่แกน Psi (ψ) ต่างๆ และสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า $d_{\varphi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ดังตารางที่ 4.6



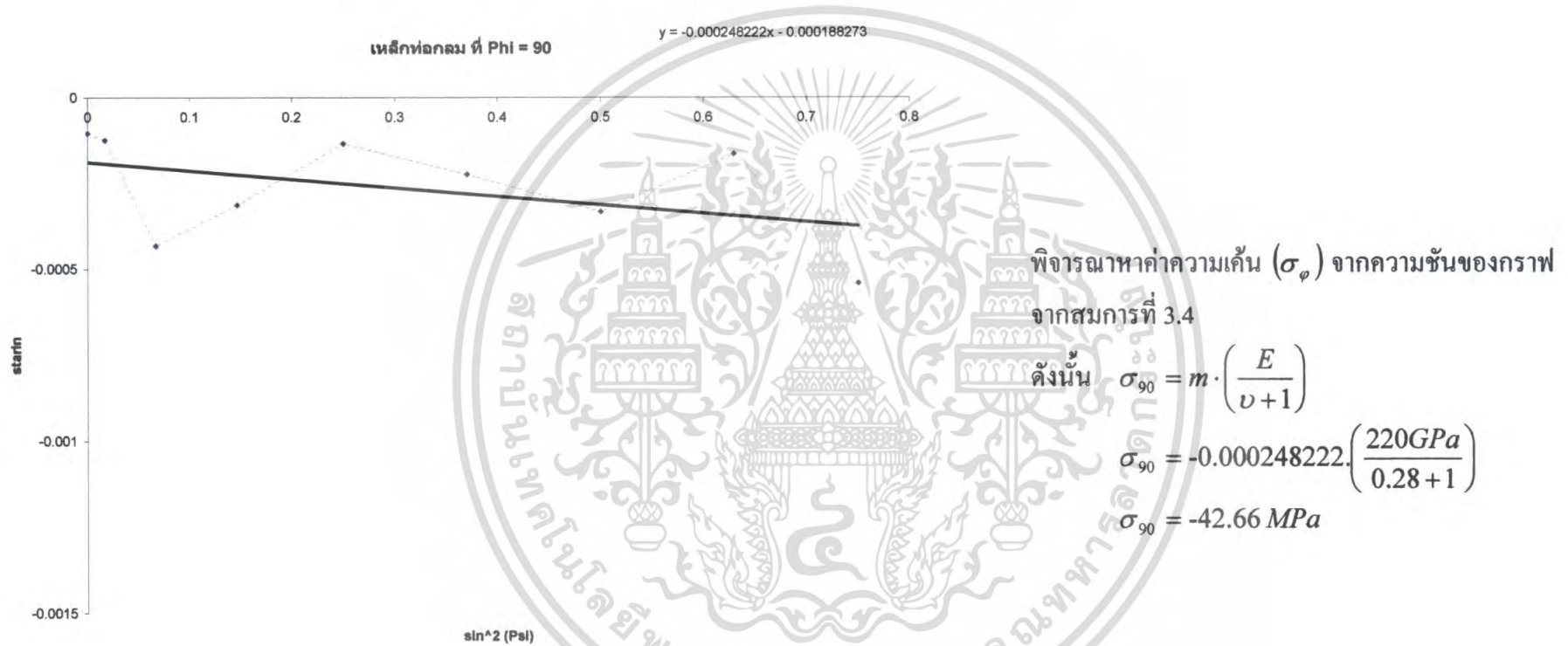
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน $\varphi = 90^\circ$ ในมุม ψ ต่างๆของเหล็กที่ออกกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงการหาค่า $d_{\phi\psi}$ และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กทอกลมเมื่อพิจารณาที่ $\text{Phi} (\phi) = 90^\circ$

Psi (ψ)	$2\theta_{\phi\psi}$	$\theta_{\phi\psi}$	$\sin \theta_{\phi\psi}$	$2\sin \theta_{\phi\psi}$	$d_{\phi\psi} = \frac{\lambda}{2\sin \theta}$	$\varepsilon = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0}$	$\sin^2 \psi$
0	82.389	41.1945	0.65861723	1.317234461	1.169571588	-0.000104136	0
7.5	82.391	41.1955	0.658630364	1.317260727	1.169548267	-0.000124074	0.017037
15	82.422	41.211	0.658833901	1.317667803	1.169186951	-0.000432972	0.066987
22.5	82.41	41.205	0.658755118	1.317510236	1.169326778	-0.00031343	0.146447
30	82.392	41.196	0.65863693	1.31727386	1.169536606	-0.000134042	0.25
37.5	82.401	41.2005	0.658696026	1.317392052	1.169431679	-0.000223747	0.37059
45	82.412	41.206	0.658768249	1.317536498	1.16930347	-0.000333356	0.5
52.5	82.395	41.1975	0.658656629	1.317313258	1.169501628	-0.000163947	0.62941
60	82.433	41.2165	0.658906113	1.317812225	1.169058816	-0.000542517	0.75

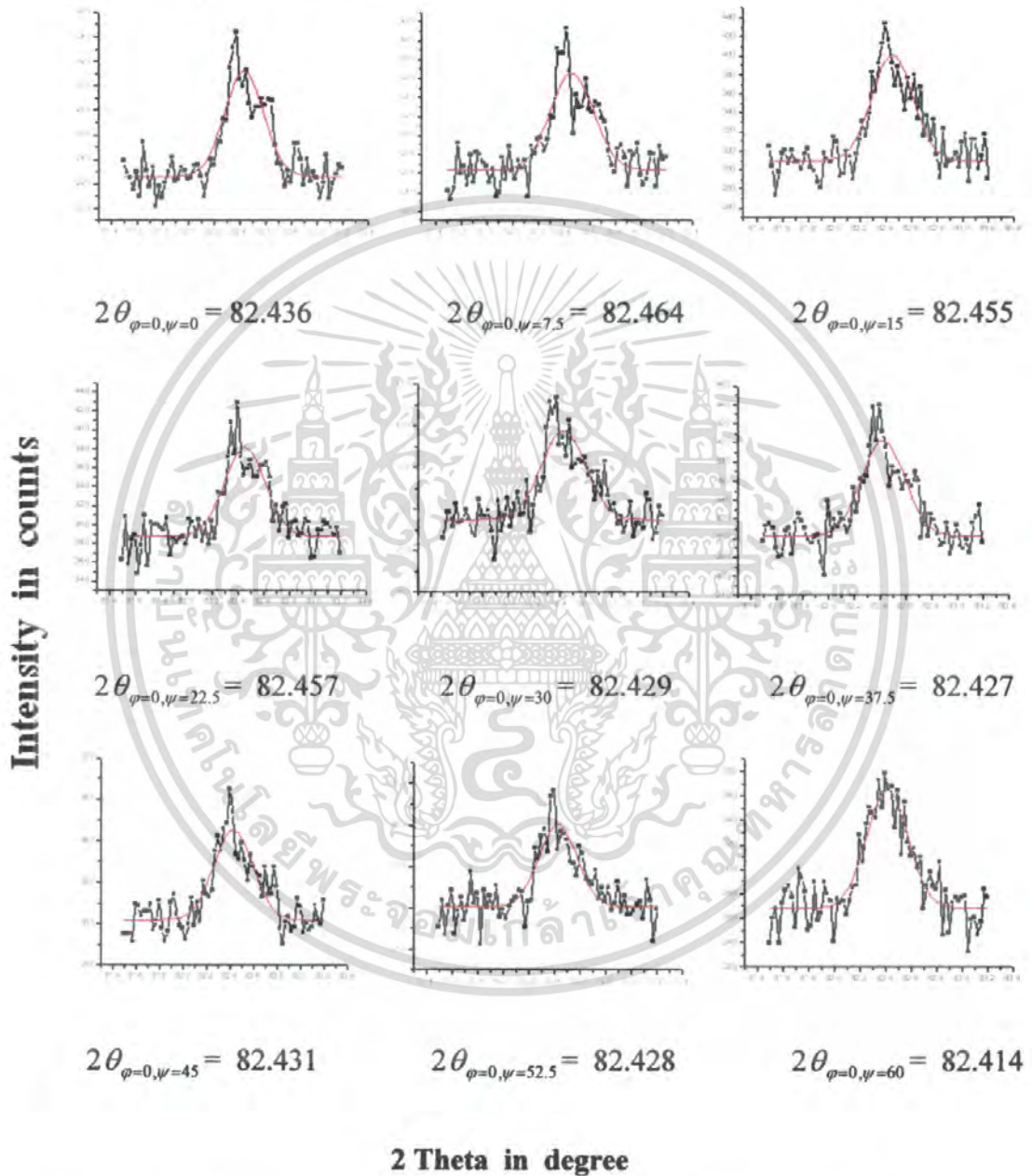
เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$ กับ $\sin^2 \psi$ ที่ $\Phi (\varphi) = 90^\circ$



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กพอลกอมที่ $\varphi = 90^\circ$

3) วิเคราะห์หลักทอสีเหลี่ยม

ก. พิจารณาที่ $\varphi = 0^\circ$ จากรูปที่ 4.21 จะได้ค่าของมุม 2θ ที่แกน Psi (ψ) ต่างๆ และสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า $d_{\varphi\psi}$ และ $\sin^2\psi$ ดังตารางที่ 4.7



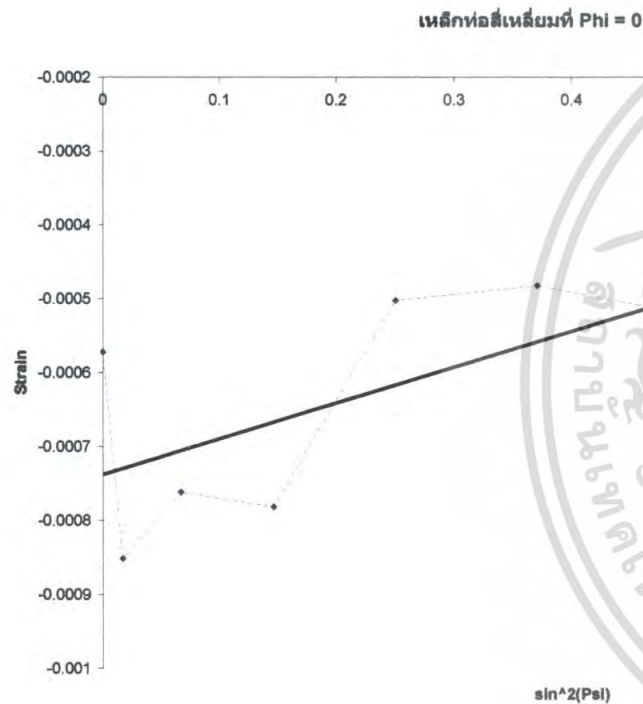
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน $\varphi = 0^\circ$ ในมุม ψ ต่างๆของหลักทอสีเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงการหาค่า d_{ψ} และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กทอสี่เหลี่ยมเมื่อพิจารณาที่ $\Phi (\varphi) = 0^\circ$

Psi (ψ)	$2\theta_{\psi}$	θ_{ψ}	$\sin \theta_{\psi}$	$2\sin \theta_{\psi}$	$d_{\psi} = \frac{\lambda}{2\sin \theta}$	$\varepsilon = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$	$\sin^2 \psi$
0	82.436	41.218	0.658925806	1.317851611	1.169023877	-0.000572388	0
7.5	82.464	41.232	0.659109585	1.31821917	1.168697918	-0.000851058	0.017037
15	82.455	41.2275	0.659050517	1.318101035	1.168802663	-0.000761509	0.066987
22.5	82.457	41.2285	0.659063644	1.318127288	1.168779384	-0.000781411	0.146447
30	82.429	41.2145	0.658879855	1.317759709	1.169105406	-0.000502687	0.25
37.5	82.427	41.2135	0.658866725	1.317733451	1.169128703	-0.000482769	0.37059
45	82.431	41.2155	0.658892984	1.317785968	1.16908211	-0.000522603	0.5
52.5	82.428	41.214	0.65887329	1.31774658	1.169117054	-0.000492728	0.62941
60	82.414	41.207	0.65878138	1.31756276	1.169280164	-0.000353282	0.75

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$ กับ $\sin^2\psi$ ที่ $\Phi (\varphi) = 0^\circ$



พิจารณาหาค่าความเค้น (σ_ϕ) จากความชันของกราฟ จากสมการที่ 3.4

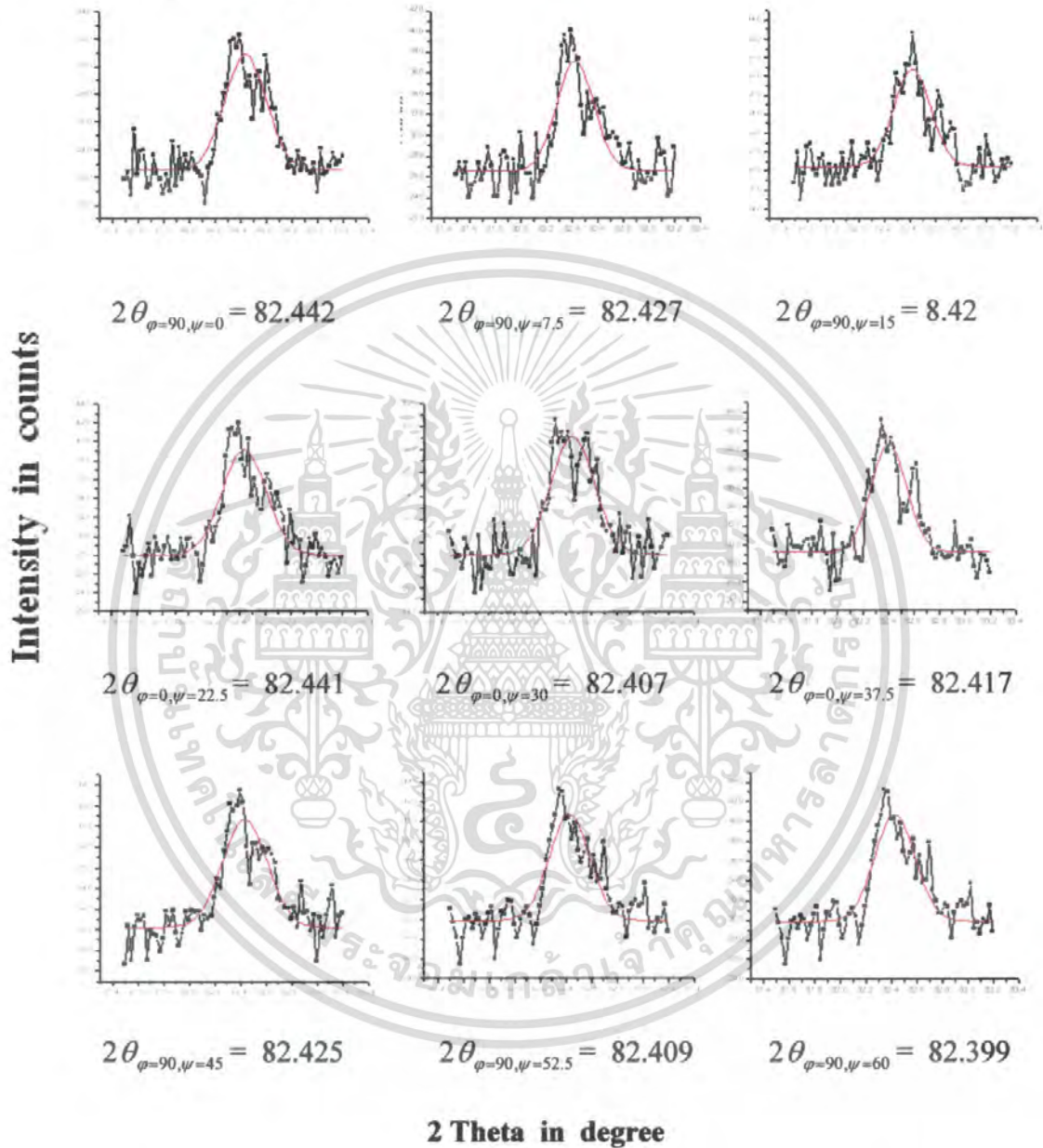
ดังนั้น
$$\sigma_0 = m \cdot \left(\frac{E}{\nu + 1} \right)$$

$$\sigma_0 = 0.000483606 \cdot \left(\frac{220 \text{ GPa}}{0.28 + 1} \right)$$

$$\sigma_0 = 83.12 \text{ MPa}$$

รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของความเครียดกับความเค้นกับ $\sin^2\psi$ ของเหล็กท่อสี่เหลี่ยมที่ $\varphi=0^\circ$

ข. พิจารณาที่ $\varphi = 90^\circ$ จากรูปที่ 4.23 จะได้ค่าของมุม 2θ ที่แกน Psi (ψ) ต่างๆ และสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่า $d_{\varphi\psi}$ และ $\sin^2\psi$ ดังตารางที่ 4.8



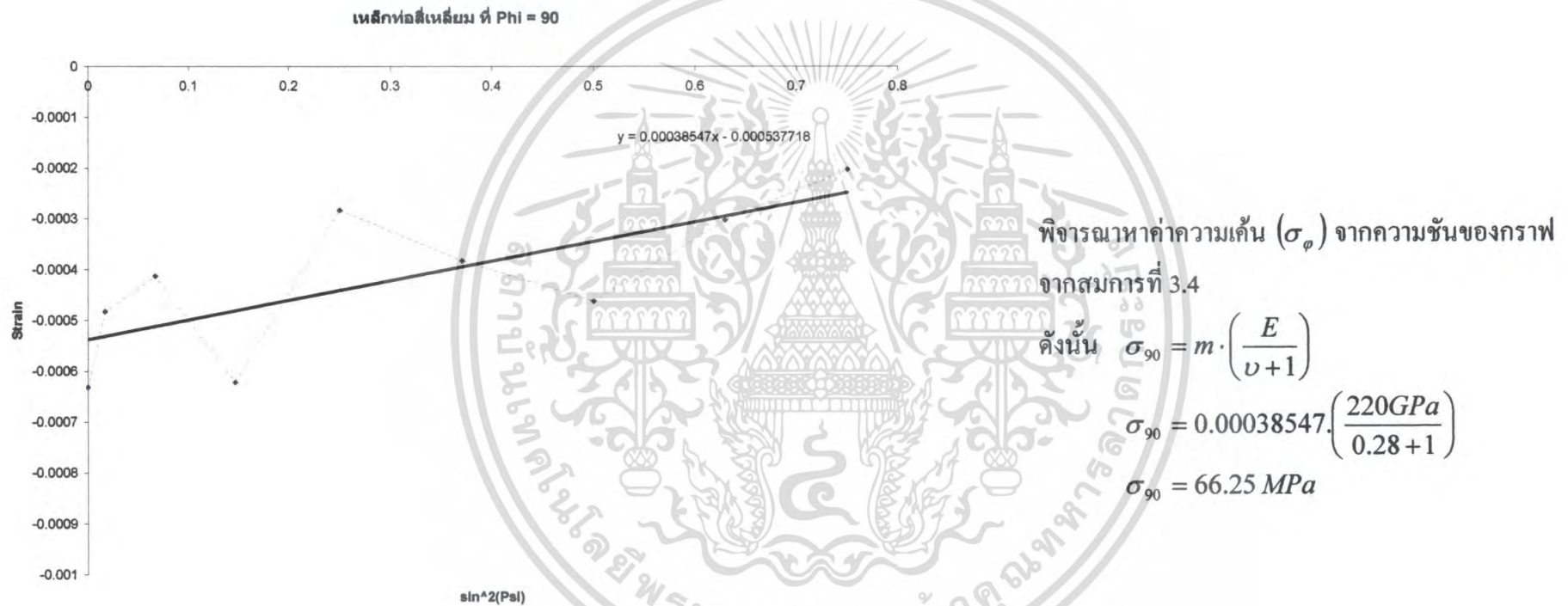
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟการเลี้ยวเบนที่แกน $\varphi=90^\circ$ ในมุม ψ ต่างๆของเหล็กทอสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงการหาค่า d_{ψ} และ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กท่อสี่เหลี่ยมเมื่อพิจารณาที่ $\Phi (\varphi) = 90^\circ$

Psi (ψ)	$2\theta_{\psi}$	θ_{ψ}	$\sin \theta_{\psi}$	$2\sin \theta_{\psi}$	$d_{\psi} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$	$\varepsilon = \frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$	$\sin^2 \psi$
0	82.442	41.221	0.65896519	1.317930381	1.168954007	-0.000632121	0
7.5	82.427	41.2135	0.658866725	1.317733451	1.169128703	-0.000482769	0.017037
15	82.42	41.21	0.658820771	1.317641543	1.169210252	-0.000413051	0.066987
22.5	82.441	41.2205	0.658958626	1.317917253	1.168965652	-0.000622166	0.146447
30	82.407	41.2035	0.658735421	1.317470843	1.169361742	-0.000283538	0.25
37.5	82.417	41.2085	0.658801076	1.317602152	1.169245207	-0.000383168	0.37059
45	82.425	41.2125	0.658853596	1.317707192	1.169152001	-0.000462851	0.5
52.5	82.409	41.2045	0.658748553	1.317497105	1.169338433	-0.000303466	0.62941
60	82.399	41.1995	0.658682894	1.317365788	1.169454994	-0.000203815	0.75

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0}$ กับ $\sin^2 \psi$ ที่ Phi (φ) = 90°



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ของความเครียดกับ $\sin^2 \psi$ ของเหล็กท่อสี่เหลี่ยมที่ $\varphi = 90^\circ$

บทที่ 5

สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการวัดและวิเคราะห์สารตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง คือ ทั้งสแตน, เหล็กแผ่น เหล็กท่อกลม และเหล็กท่อสี่เหลี่ยม หรือเหล็กกล่อง สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) จากการวัดชิ้นงานมาตรฐานที่เป็นทั้งสแตนนั้น ได้ค่าความเค้นคงค้างไม่เกิน ± 14 MPa แสดงว่าไม่มีความเค้นคงค้างภายในชิ้นงาน (ตามมาตรฐาน ASTM) แต่ในสารตัวอย่างเหล็กแผ่น, เหล็กท่อกลม และเหล็กท่อสี่เหลี่ยม หรือเหล็กกล่อง มีความเค้นคงค้างอยู่ในชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการการผลิต คือการรีดร้อน รีดเย็น รวมไปถึงการอัดขึ้นรูปหรือการดึงขึ้นรูปก็ตาม และโดยส่วนใหญ่แล้วจะทำกระบวนการขึ้น ไปกระบวนการรีดเย็นจะเป็นการแปรรูปที่อุณหภูมิห้อง หรือสูงเล็กน้อยแต่ต่ำกว่าอุณหภูมิของการตกผลึกใหม่ (Recrystallisation temperature) จะทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic Deformation) ผลของการเปลี่ยนรูปร่างถาวรก็คือ ความเครียดของชิ้นงาน เพิ่มขึ้น , จำนวนของขอบเกรน เพิ่มขึ้นและจำนวนของดิสโลเคชันเพิ่มขึ้น หรือโดยรวมแล้วก็คือวัสดุจะมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้วัสดุมีการยืดหยุ่นน้อยลง ความแข็งที่เพิ่มขึ้นนี้ ก็คือ ‘ความเค้นคงค้าง’ ซึ่งจะทำให้การขึ้นรูปขึ้นต่อมา (ถ้ามี) ทำได้ยากขึ้นและแม้แต่ชิ้นงานที่สำเร็จแล้วก็จำเป็นต้องมีการลดความเค้น เพื่อเพิ่มความเหนียว มิเช่นนั้นจะทำให้เกิดการแตกแบบเปราะระหว่างการใช้งาน การลดความเค้น สามารถทำได้โดย การอบ (ให้ความร้อน) เรียกว่า Annealing:อบลดความแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิของการตกผลึกใหม่ (Recrystallisation temperature) ของเหล็ก แต่อย่างไรก็ตาม การอบก็ยังไม่สามารถที่จะลดความเค้นจนหมดได้

2) ผลจากการคำนวณความเค้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากเครื่องมือโดยการคำนวณจะใช้ค่าความต่างของระยะห่างระหว่างโครงสร้างผลึกมาคำนวณหาความเครียดตามสมการที่ 2.3 ถ้ามีความแตกต่างระหว่างโครงสร้างผลึก ($d_{\phi\psi}$) เนื่องจากการเลือนมุม ϕ และมุม ψ ให้ความเครียดเปลี่ยนไป เพราะฉะนั้นสรุปได้ว่าระยะของโครงสร้างผลึก ($d_{\phi\psi}$) จะมีความสัมพันธ์กับความเครียดซึ่งจะทำให้ทราบค่าความเค้นคงค้างภายในชิ้นงานได้ และตารางที่ 5.1 จะแสดงผลของการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากเครื่องมือ

ตารางที่ 5.1 แสดงผลของการคำนวณเปรียบเทียบกับค่าความเค้นที่ได้จากเครื่องมือ

สารตัวอย่าง		ความเค้นคงค้างที่ ได้จากเครื่องมือ (MPa)	ความเค้นคงค้างที่ได้ จากการคำนวณ (MPa)	ความเค้นคง ค้าง
ทั้งสเดน	Phi = 0°	12 ± 3	14.71	ไม่มี
	Phi = 90°	6 ± 5	11.29	ไม่มี
เหล็กแผ่น	Phi = 0°	30 ± 25	53.76	มี
	Phi = 90°	70 ± 53	34.85	มี
เหล็กท่อ กลม	Phi = 0°	-28 ± 29	-34.49	มี
	Phi = 90°	-25 ± 60	-42.66	มี
เหล็กท่อ สี่เหลี่ยม	Phi = 0°	74 ± 23	83.12	มี
	Phi = 90°	64 ± 23	66.25	มี

*ไม่มีความเค้นคงค้าง คือ ค่าความเค้นอยู่ในช่วง ± 14 MPa

5.2) ข้อเสนอนะ

การเตรียมสารตัวอย่างควรจะทำให้มีผิวเรียบที่สุดซึ่งดูได้จากตารางที่ 5.1 เหล็กที่มีค่าความเค้นไม่ได้ในช่วงที่ถูกต้องเป็นเหล็กแผ่น ซึ่งเหล็กแผ่นนี้มีความเรียบน้อยกว่าเหล็กท่อกกลมและเหล็กท่อสี่เหลี่ยมที่ได้ผ่านการรีดเย็น (ผิวเรียบเนียนกว่ารีดร้อน) วิธีแก้ อาจจะใช้กระดาษทรายเบอร์ละเอียดขัดเหล็กก่อนทำการวัด และจะเกิดข้อผิดพลาดมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับความละเอียดของผู้ทำการทดลองด้วย

เอกสารอ้างอิง

นายสุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ ,โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานของเหล็กกล้าคาร์บอน , สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย:กรุงเทพมหานคร, 2550

นางสาวกมลวรรณ วันหวัง, นางสาวชติดา สารใจ, นางสาวทศวัลย์ เลิศประถัสสร, การศึกษาการติดตั้งและการวิเคราะห์ของระบบการวัดอุณหภูมิสูงในเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง:กรุงเทพมหานคร,2548

นายพิไชยลักษณ์ ปัทมาภรณ์ และ นางสาวนวภรณ์ ประสมเพ็ชร,ไมโครเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง:กรุงเทพมหานคร,2549

หนังสือคู่มือX-Ray Diffractometer ของ Bruker AXS Model D8 Discover

สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์, เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, มาวิน สุประดิษฐ ฌ อรุชยา, กอบบุญ หล่อทองคำ ราชาย เหลืองวรานันท์และนายปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล, วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุ พื้นฐาน:กรุงเทพมหานคร,2549

ชวลิต เชียงกุล, โลหะวิทยา, สยามคัมสงเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) : กรุงเทพมหานคร, 2542

บัณฑิต ใจชื่น,โลหะวิทยากายภาพ , สำนักพิมพ์ประกอบเมโทร: กรุงเทพมหานคร, 2527

Paul S. Prevéy ,X-RAY DIFFRACTIONRESIDUAL STRESS TECHNIQUES, Lambda Research Inc

OSMAN ANDEROGLU, RESIDUAL STRESS MEASUREMENT USING X-RAY DIFFRACTION, Texas A&M University, 2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้