

การปรับแก้ตัวตรวจฉบับที่อิมเพลตแบบธรรมดาเพื่อการศึกษาการเดี่ยวเบนของรังสีเอกซ์
แบบสองมิติจากผลึกผง



นายรัฐ มโนธัม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

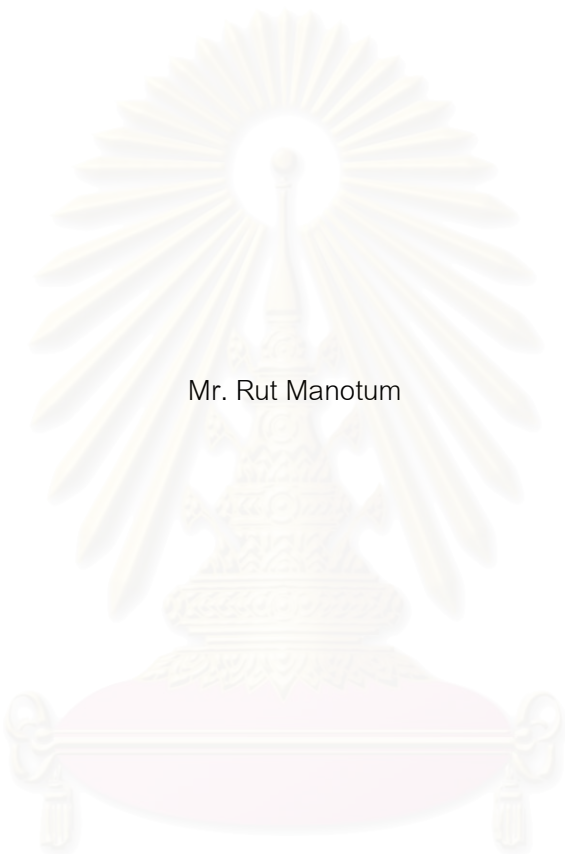
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONVENTIONAL IMAGE-PLATE AREA DETECTOR CALIBRATION FOR TWO DIMENSIONAL X-RAYS
POWDER DIFFRACTION



Mr. Rut Manotum

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับแต่งตัวตรวจจับพื้นที่อินเจเพลดแบบธรรมดาเพื่อการศึกษา
การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบสองมิติจากผลึกผง

โดย

นาย รัฐ มโนธัม

สาขาวิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

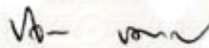
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธิติ บวรรัตนารักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

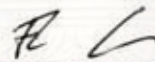


..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิตา ชัตตรากรณ์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธิติ บวรรัตนารักษ์)



..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. สันติพงศ์ บริบาล)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นคร ไพศาลกิตติสกุล)

รัฐ มโนธัม : การปรับแต่งตัวตรวจจับพื้นที่อิมเมจเพลตแบบธรรมดาเพื่อการศึกษาการ
 เลี้ยวเบน ของรังสีเอกซ์แบบสองมิติจากผลึกผง. (CONVENTIONAL IMAGE-PLATE
 AREA DETECTOR CALIBRATION FOR TWO DIMENSIONAL X-RAYS
 POWDER DIFFRACTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ธิตี บวรรัตนารักษ์,
 89 หน้า.

การปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลตโดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด สำหรับใช้ใน
 การทดลองเพื่อหาโครงสร้างของผลึกผงภายใต้ความดันบรรยากาศ เพื่อพัฒนาไปใช้ในการศึกษา
 โครงสร้างของผลึกผงในภาวะความดันสูง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชนิดกระจายมุม
 โดยทำการทดลองที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ใช้คลื่นรังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่น
 1.377 Å และใช้ ZnO เป็นสารตัวอย่างเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของวิธีการปรับแต่งเครื่องอ่าน
 อิมเมจเพลต โดยนำข้อมูลจากการทดลองของสารมาตรฐาน Al₂O₃ มาทำการแปลงหน่วยวัด
 เพื่อแปลงข้อมูลจากค่าความเข้มกับระยะทางให้เป็นค่าความเข้มกับมุม 2θ สำหรับนำไปใช้ศึกษา
 โครงสร้างและหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ ของสารตัวอย่าง ZnO

ผลการทดลองด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของ
 วิธีการปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลต พบว่า ZnO มีโครงสร้างแบบ Hexagonal โดยมีค่า
 แลตทิซ พารามิเตอร์ เป็น $a = b = 3.2581(8) \text{ \AA}$ และ $c = 5.220(3) \text{ \AA}$ โดยค่าแลตทิซ
 พารามิเตอร์มีค่าแตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Kisi E. H. และ Elcombe ซึ่งได้จาก
 ฐานข้อมูลของผลึกมาตรฐานน้อยมาก จึงทำให้สรุปได้ว่าการปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลตโดย
 วิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด สามารถนำไปใช้ศึกษาโครงสร้างของผลึกผง และสามารถนำไป
 พัฒนาเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกผงภายใต้ความดันสูงได้ โดยค่ามุมของยอดที่
 นำมาใช้ในการหาโครงสร้างซึ่งตรงตามกฎของแบรกก์ต้องมีค่าไม่เกินมุมสูงสุดที่สารมาตรฐานมี
 แถบการเลี้ยวเบน

ภาควิชา : ฟิสิกส์
 สาขาวิชา : ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา : 2551

ลายมือชื่อนิสิต : 
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : 

4872435023 : MAJOR PHYSICS

KEYWORDS : X-RAY DIFFRACTION / IMAGE-PLATE / ZnO / DETECTOR / Al₂O₃

RUT MANOTUM : CONVENTIONAL IMAGE-PLATE AREA DETECTOR

CALIBRATION FOR TWO DIMENSIONAL X-RAYS POWDER DIFFRACTION.

ADVISOR: ASST. PROF. THITI BOVORN RATANARAKS, Ph.D., 89 pp.

Grid calibration method for conventional Image-Plate have been used for structure determination of powder sample. This techniques have been developed for sample under high-pressure condition. The angle dispersive X-rays powder diffraction techniques were performed at Siam Photon source with X-rays wavelength 1.377 \AA . ZnO is used to verify the quality of grid calibration method. The Al₂O₃ is standard sample used for data conversion from Intensity vs. Distance into Intensity vs. 2θ in order to determine the crystal structure and lattice parameter of ZnO.

Results of X-rays diffraction show that structure of ZnO is Hexagonal with lattice parameters $a = b = 3.2581(8) \text{ \AA}$ and $c = 5.220(3) \text{ \AA}$. The difference in lattice parameters compare with crystal database that was performed by Kisi E. H and Elcombe is very low. Therefore, the grid calibration method has been shown to be the powerful techniques to determine lattice parameters of unknown sample.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Physics

Student's Signature : 

Field of Study : Physics

Advisor's Signature : 

Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ ถ้าไม่มีการสนับสนุนและความช่วยเหลือจากทุกท่าน ทุกภาคส่วน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธิติ บวรรัตนารักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับแนวคิดของหัวข้อวิทยานิพนธ์ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างที่ทำค่าเปรียบมิได้ ความเอาใจใส่เชื้ออาหาร และทุกสิ่งทุกอย่างที่ท่านได้เปิดโลกทัศน์และโอกาสให้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้พบเห็น

ขอขอบพระคุณกรรมการคุมสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ยิ่ง อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาการ แนวคิด ที่ส่งผลกับการพัฒนาตนเอง และการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างยิ่ง

ที่ขาดมิได้ขอกราบขอบพระคุณพ่อ สมชาย และคุณแม่อารีย์ สำหรับโอกาสในการศึกษาต่อ และกำลังใจอย่างล้นพ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โครงสร้างผลึก.....	5
2.2 การระบุดัชนีระนาบผลึก.....	8
2.3 การศึกษาค่าคงที่ของโครงผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	12
2.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	19
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึก.....	21
2.6 การกระเจิงของรังสีเอกซ์โดยอิเล็กตรอน.....	22
2.7 การกระเจิงของรังสีเอกซ์โดยอะตอม.....	23
2.8 การกระเจิงของรังสีเอกซ์เนื่องจากเซลล์หนึ่งหน่วย (Unit cell).....	25
3 อิเมจเพลตและการปรับแต่งอิเมจเพลต.....	32
3.1 อิเมจเพลต.....	32
3.2 การปรับแต่งอิเมจเพลต.....	39
3.3 การรวมข้อมูลแบบสองมิติ.....	43
3.4 การเทียบมาตรฐานข้อมูล (Data Calibration).....	45

4	วิธีการทดลอง.....	46
	4.1 วิธีการทดลองหาโครงสร้างของผลึก ZnO.....	46
	4.2 ขั้นตอนการหาโครงสร้างผลึกของสาร.....	59
5	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	63
	5.1 ผลการปรับแต่งเครื่องเครื่องอ่านเอ็กซเรย์ผลึกโดยวิธีการเทียบมาตรฐาน โดยใช้กริด.....	63
	5.2 ผลการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อนำไปใช้หาโครงสร้างของ ผลึกผง ZnO.....	68
	5.3 การหาโครงสร้างของสารตัวอย่าง ZnO.....	77
6	สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย.....	81
	6.1 วิธีการปรับแต่งเครื่องอ่านเอ็กซเรย์ผลึกโดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดย ใช้กริด.....	81
	6.2 สารตัวอย่าง ZnO.....	81
	รายการอ้างอิง.....	84
	ภาคผนวก.....	87
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงสมบัติของบราวน์แลตทิซในระบบลูกบาศก์.....	8
4.1	แสดงค่าความหนาของสารตัวอย่างและค่าขอบของการดูดกลืนของสารนั้น....	49
4.2	แสดงวิธีการคำนวณหาดัชนีระบุนานาของผลึกของโปรแกรม Dicvol06.....	60
6.1	แสดงผลต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ ZnO และจากการคำนวณตามทฤษฎี.....	82



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบกับระนาบของผลึกแล้วเกิดการเลี้ยวเบนตามกฎของแบรกก์.....	1
1.2 แสดงส่วนประกอบเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูงโดยวิธีการสะท้อนของบริษัทฟิลิปส์.....	3
1.3 การจัดเรียงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชนิดกระจายมุมโดยใช้วิธีส่งผ่าน ที่ The Daresbury Synchrotron Radiation Source (SRS), UK.....	3
2.1 แสดงโครงสร้างผลึก ซึ่งประกอบด้วย ก) แลตทิซ ข) เบซิส โดยเบซิสจะเรียงตัวได้ 2 แบบ คือ ค) อยู่บนจุดแลตทิซ หรือ ง) อยู่ที่ตำแหน่งห่างจากจุดแลตทิซเป็นระยะทางคงที่.....	6
2.2 แสดงเวกเตอร์การเลือนตำแหน่ง และมุมระหว่างเวกเตอร์การเลือนตำแหน่งในเซลล์หนึ่งหน่วย.....	7
2.3 บราวส์แลตทิซ.....	7
2.4 ระนาบ (h k l) ที่ตัดกับเซลล์หนึ่งหน่วย.....	9
2.5 \overline{OD} คือ เส้นตรงที่แสดงระยะห่างระหว่างระนาบถึงจุดกำเนิด.....	9
2.6 แสดงสามเหลี่ยม ODS และสามเหลี่ยม ODC เป็นสามเหลี่ยมคล้ายกัน.....	10
2.7 แสดงรูปสามเหลี่ยม ABO กับสามเหลี่ยม AOS เป็นสามเหลี่ยมคล้าย.....	11
2.8 แสดงค่าความยาวคลื่นในย่านต่างๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	13
2.9 แสดงส่วนประกอบภายในของหลอดรังสีเอกซ์.....	13
2.10 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากเป้าทังสเตนโดยใช้ค่าพลังงานในการเร่งอิเล็กตรอนเป็น 80, 100, 120 และ 140 keV.....	15
2.11 แสดงแผนภาพการทดลองเพื่อวัดการดูดกลืนของรังสีเอกซ์โดยสารตัวอย่าง.....	16
2.12 ก) รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร ข) อิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่ โดยคายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา.....	17

ภาพที่	หน้า	
2.13	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและค่าขอบของการดูดกลืนของคาร์บอน ไนโตรเจนและออกซิเจน.....	18
2.14	แสดงแถบค่าความยาวคลื่นที่ได้จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้คอปเปอร์เป็นเป้า ก) ก่อนและ ข) หลังจากผ่านนิกเกิลที่ใช้เป็นตัวคัดแยก เส้นประคือค่าสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนเชิงมวลของนิกเกิล.....	19
2.15	แสดงแผนผังของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ในย่าน GeV โดยตัวเร่ง อิเล็กตรอนและถูกทำให้งอโดยแม่เหล็กเบนดิ่ง และแม่เหล็กตัวแกว่งหรือแม่เหล็ก ตัวกระเพื่อม ภายในวงแหวนการเก็บ.....	20
2.16	แสดงแถบค่าพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ภายในแหล่งกำเนิด แสงซินโครตรอน ทั้ง 3 ประเภท.....	21
2.17	แสดงภาพรังสีเอกซ์กระเจิงจากระนาบของผลึก โดยเงื่อนไขในการเลี้ยวเบนขึ้นอยู่กับ กับผลต่างทางเดินของรังสีเอกซ์.....	22
2.18	แสดงการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากอิเล็กตรอนหนึ่งตัวซึ่งค่า I จะขึ้นอยู่กับมุม θ	25
2.19	แสดงภาพการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากอะตอม.....	26
2.20	แสดงการกระเจิงของรังสีเอกซ์เนื่องจากะนาบของผลึกภายในเซลล์หนึ่งหน่วย...	27
2.21	แสดงการพิจารณาการรวมกันของคลื่นรังสีเอกซ์ในรูปของฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล	29
2.22	แสดงการรวมกันของคลื่นรังสีเอกซ์ในรูปของเวกเตอร์.....	31
3.1	แสดงส่วนประกอบของอิมัลชัน.....	33
3.2	แสดงอิมัลชันขณะที่กำลังถูกกวาดด้วยลำแสงเลเซอร์และถูกเก็บข้อมูลเข้าสู่ เครื่องตรวจจับและขยายสัญญาณแสง (photomultiplier tube) เพื่อแปลงเป็น สัญญาณไฟฟ้า.....	34
3.3	แสดงกระบวนการในการใช้งานอิมัลชันที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง หลังจากลบด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ (visible light).....	34
3.4	ภาพแสดงกระบวนการเปล่งแสงของอิมัลชัน.....	36
3.5	แสดงเครื่องลบภาพบนอิมัลชัน ก) อิมัลชันขณะทำการลบภาพด้วย เครื่องลบภาพบนอิมัลชัน ข) ลักษณะภายในเครื่องลบอิมัลชัน.....	36

ภาพที่	หน้า
3.6	แสดงข้อมูลที่ตกค้างอยู่บนอิเมจเพลตเนื่องจากการลบภาพไม่หมด 37
3.7	แสดงผลของการรวมข้อมูลของอิเมจเพลตที่ทำการลบภาพออกไม่หมด เครื่องหมาย ☆ หมายถึงยอดที่เกิดจากการลบภาพออกไม่หมด 38
3.8	แสดงจุดของเลเซอร์ในแต่ละตำแหน่งบนอิเมจเพลต 40
3.9	ก)แสดงภาพจำลองของแผ่นนิกเกิล ข) แสดงภาพการฉายรังสีผ่านแผ่นนิกเกิล เพื่อทำให้เกิดภาพจุดสม่ำเสมอ ค) แสดงภาพจุดบนอิเมจเพลตที่เกิดจากการฉาย รังสีผ่านแผ่นนิกเกิล..... 41
3.10	วิธีการแบ่งครึ่งเพื่อทำการปรับแต่งอิเมจเพลตโดยวิธีการเทียบมาตรฐาน โดยใช้กริด..... 42
3.11	แสดงการแบ่งอิเมจเพลตของเป็นส่วนย่อยเพื่อรวมข้อมูลให้เหลือเพียง 1 มิติ..... 43
3.12	แสดงผลการรวมข้อมูลจากแต่ละส่วนย่อยบนอิเมจเพลตในลักษณะ 1 มิติ ระหว่างค่าความเข้มกับระยะทาง..... 44
3.13	ภาพแสดงอิเมจเพลตซึ่งไม่ได้ตั้งฉากกับรังสีเอกซ์ที่มาตกกระทบ..... 44
4.1	แสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองเพื่อหาโครงสร้างของผลึกผง ZnO โดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบส่องผ่าน ณ สถาบันวิจัยที่ 2 สถาบันวิจัย แสงซินโครตรอนแห่งชาติ..... 46
4.2	แสดงภาพจำลองแผ่นอะลูมิเนียมสำหรับใส่สารตัวอย่างสำหรับการทดลอง..... 47
4.3	แสดงตัวทำแสงเอกรงค์แบบผลึกคู่..... 48
4.4	แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับการปรับตัวทำแสงเอกรงค์โดยวิธีการเทียบ มาตรฐานโดยใช้พลังงาน..... 49
4.5.	แสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลและอนุพันธ์อันดับที่ 1 สำหรับ หาค่าขอบของการดูดกลืน..... 50
4.6	แสดงภาพตัวทำขนานซึ่งนำมาใช้ในการทดลองด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์..... 51
4.7	แสดงฐานวางสารตัวอย่างซึ่งใช้ในงานวิจัย โดยสามารถปรับระยะได้ทั้ง 3 แกน ก)ส่วนประกอบของฐานวางสารตัวอย่างสำหรับปรับระยะในส่วนของความสูง ข)ส่วนประกอบของฐานวางสารตัวอย่างสำหรับปรับระยะในแนวตั้งฉาก กับลำรังสีเอกซ์ทั้ง 2 แนว..... 52

ภาพที่	หน้า	
4.8	แสดงกราฟความเข้มพื้นหลังบนอิมเมจเพลตที่เกิดจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์เนื่องจากอากาศ.....	53
4.9	แสดงรอยไหม้ที่เกิดจากรังสีเอกซ์ทำปฏิกิริยาบนกระดาษที่ใช้สำหรับการปรับแนว.....	54
4.10	แสดงภาพการจับวางอุปกรณ์ เพื่อการปรับแนวก่อนทำการทดลองด้วยสารตัวอย่าง ZnO.....	55
4.11	แสดง ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนอิมเมจเพลต ข) ผลการรวมข้อมูลจากรูป ก) โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับระยะจากจุดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบด้วยโปรแกรม Edipus.....	57
4.12	แสดงแผนภาพวิธีการทดลองในงานวิจัย.....	58
5.1	แสดงจุดกริดบนอิมเมจเพลตที่เกิดจากการฉายคลื่นรังสีเอกซ์ที่รัวโอเลตผ่านแผ่นนิคเกิลลงบนอิมเมจเพลต.....	63
5.2	แสดงภาพจากโปรแกรม grid ที่ทำการพิตตำแหน่งในรูปของพิกเซลบนอิมเมจเพลต.....	64
5.3	แสดงข้อมูลใน 1 มิติ ของยอดที่ตรงกับวงแหวน Debye Scherrer.....	65
5.4	แสดงภาพวงแหวนการแทรกสอดบนอิมเมจเพลตที่มีลักษณะเอียง และข้อมูลที่ได้จากการรวมข้อมูลจากเพลตดังกล่าว เครื่องหมาย + หมายถึง ยอดที่เกิดจากการรวมข้อมูลคลาดเคลื่อน.....	67
5.5	แสดงวงแหวน Debye Scherrer บนอิมเมจเพลตที่ได้จากการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่าง ZnO.....	69
5.6	แสดงวงแหวน Debye Scherrer บนอิมเมจเพลตที่ได้จากการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารมาตรฐาน Al ₂ O ₃	70
5.7	แสดงกราฟการรวมข้อมูลของวงแหวนการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่าง ZnO คู่กับรูปวงแหวนการเลี้ยวเบนของ ZnO บนอิมเมจเพลต	71

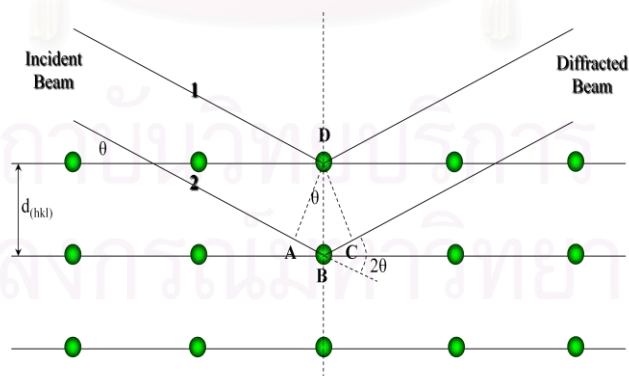
ภาพที่	หน้า	
5.8	แสดงกราฟการรวมข้อมูลของวงแหวนการเลี้ยวเบนของสารมาตรฐาน Al_2O_3 คู่กับ รูปวงแหวนการเลี้ยวเบนของ Al_2O_3 บนอิเมจเพลต.....	72
5.9	กราฟแสดงผลการคำนวณค่าระยะห่างของระนาบผลึกสำหรับยอดของการ เลี้ยวเบนและดัชนีระนาบของผลึกที่สอดคล้องกัน.....	73
5.10	กราฟแสดงข้อมูลของการเลี้ยวเบนของสารมาตรฐาน Al_2O_3 และดัชนีระนาบ ผลึก.....	73
5.11	แสดงหน้าต่างข้อมูลที่ใช้สำหรับโปรแกรม Calib เพื่อใช้ในการแปลงค่า ระยะทางให้เปลี่ยนเป็นค่ามุม.....	74
5.12	แสดงผลจากโปรแกรม Calib โดยเครื่องหมาย * หมายถึงยอดที่มีค่ามุมที่มี ผลต่างเกินกว่า 0.01 องศา.....	75
5.13	แสดงกราฟระหว่างค่า มุม 2θ และ ค่าระยะทาง สำหรับใช้ในการแปลงข้อมูล...	75
5.14	แสดงยอดของการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่าง ZnO ที่ได้จากการใช้สารมาตรฐาน Al_2O_3 เป็นตัวแปลงข้อมูล.....	76
5.15	แสดงหน้าต่างข้อมูลที่ใช้สำหรับการหาโครงสร้างของผลึกด้วยโปรแกรม DICVOL06.....	77
5.16	แสดงผลจากการคำนวณหาโครงสร้างของสารตัวอย่าง ZnO ด้วยโปรแกรม DICVOL06.....	78
5.17	แสดงข้อมูลที่ใช้สำหรับการหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ สำหรับโปรแกรม Unitcell..	79
5.18	แสดงผลจากการคำนวณค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ ของสารตัวอย่าง ZnO ด้วย โปรแกรม Unitcell.....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การพยายามศึกษาหาโครงสร้างของผลึก (Crystal) มีการพัฒนามาเป็นลำดับจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1895 เมื่อ Roentgen นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันได้ค้นพบรังสีเอกซ์ ที่มีค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกับขนาดของอะตอมและได้เริ่มนำรังสีเอกซ์เข้ามาใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกในปี ค.ศ. 1912 โดยอาศัยสมบัติการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)[1] เพื่อพิจารณาโครงสร้างในระดับอะตอมของผลึก ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกเพื่อหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ (Lattice parameter) และเพื่อศึกษาสมบัติของผลึกไม่ว่าจะเป็นในกรณีที่อยู่สภาวะความดันสูง (High pressure) หรือที่สภาวะความดันบรรยากาศ (Ambient pressure) ล้วนแล้วแต่อาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยอาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg law) เป็นพื้นฐาน ดังรูปที่ 1.1 รังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบนและแทรกสอดกันได้ก็ต่อเมื่อค่าผลต่างทางเดินของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับ จำนวนเท่าของค่าความยาวคลื่น เขียนเป็นสมการได้ว่า $2d\sin\theta = n\lambda$



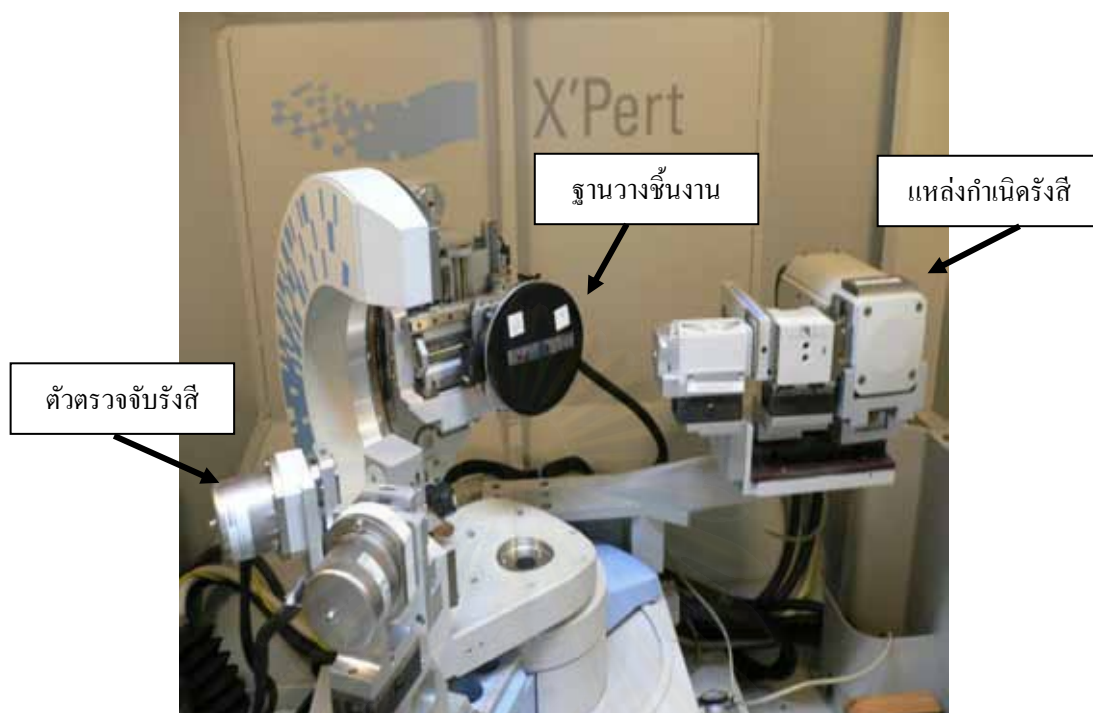
รูปที่ 1.1 แสดงรังสีเอกซ์เมื่อตกกระทบกับระนาบของผลึกแล้วเกิดการเลี้ยวเบนตามกฎของแบรกก์

โดยทั่วไปแล้วการทดลองโดยอาศัยวิธีการพิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่นิยมใช้กัน โดยทั่วไป มี 2 วิธี คือ

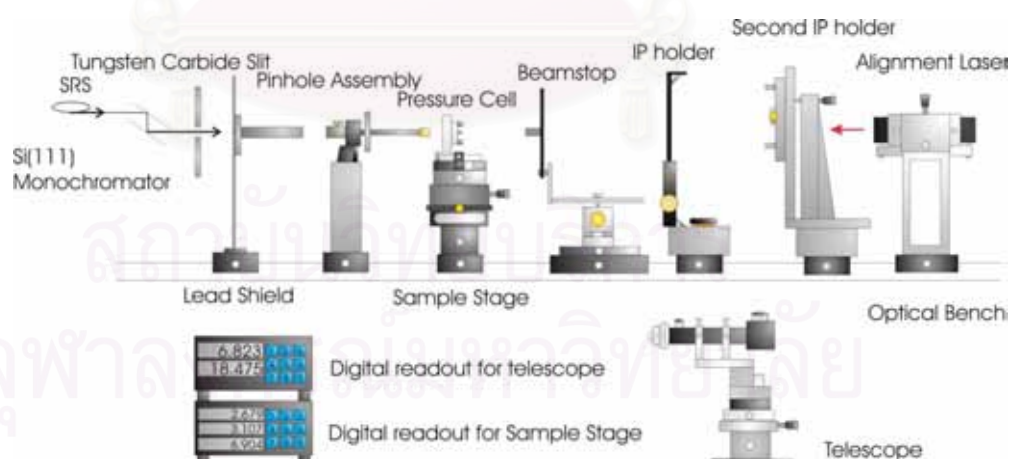
- 1) วิธีการสะท้อน (Reflection mode)
- 2) วิธีการส่งผ่าน (Transmission mode)

วิธีการดังกล่าวข้างต้นจะมีความแตกต่างกันในการจัดเรียงของอุปกรณ์ กล่าวคือในการศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยใช้วิธีการสะท้อนตัวตรวจ จับ (detector) จะอยู่ในระนาบที่ไม่ตรงกันกับระนาบของลำแสงตกกระทบ (Incident beam) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยวิธีการส่งผ่าน ตัวตรวจจับจะอยู่ในแนวเดียวกันกับระนาบของลำแสงตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 วิธีการส่งผ่านข้างต้นนี้เหมาะสำหรับการทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึกผงที่อยู่ภายใต้ความดันสูง เพราะในการทดลองดังกล่าวจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์พิเศษเพื่อที่จะนำมาใช้เพิ่มความดันให้กับสารตัวอย่าง อุปกรณ์ดังกล่าวคือ ไดมอนด์ แอนวิล เซลล์ (Diamond anvil cell) (DAC) และในการทดลองภายใต้สภาวะความดันสูงนี้ จำเป็นจะต้องใส่สารตัวอย่างภายในไดมอนด์ แอนวิล เซลล์ ด้วยรูปแบบการจัดเรียงของอุปกรณ์ จึงเหมาะที่จะทำการทดลองโดยใช้วิธีการส่งผ่าน

ในการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบส่งผ่านที่สภาวะความดันสูง จำเป็นจะต้องใช้ตัวตรวจหาที่มีประสิทธิภาพสูงในการแยกแยะข้อมูล เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยครั้งนี้มีลักษณะเป็นวงแหวนการแทรกสอด เพราะสารตัวอย่างเป็นผลึกผง (powder) ที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม ดังนั้นตัวตรวจหาที่นำมาใช้ควรจะสามารถเก็บข้อมูลได้ในสองมิติพร้อมๆกัน ตัวตรวจหาแบบอิเมจเพลต (Image Plate) จึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลในงานวิจัยครั้งนี้ โดยทั่วไปแล้วอิเมจเพลตที่ใช้ในการทดลองที่มีการแยกชัด (Resolution) สูงนั้น จะเป็นอิเมจเพลตที่สามารถแปลงข้อมูลออกมาได้ในลักษณะที่เป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital) เนื่องจากอิเมจเพลตที่สามารถแปลงข้อมูลออกมาได้เป็นสัญญาณดิจิทัลดังกล่าวมีราคาสูง ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ตัวตรวจหาที่เป็นอิเมจเพลตแบบธรรมดา (Conventional Image Plate) เป็นตัวตรวจหาโดยพยายามที่จะปรับแต่งอิเมจเพลตแบบธรรมดา ให้มีการแยกชัดที่สูงเพียงพอที่จะวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกผงภายใต้ความดันปกติ เพื่อที่จะสามารถพัฒนาต่อไปในการนำไปใช้สำหรับการทดลองในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกผงของสารตัวอย่างทั่วไปภายใต้ความดันสูงได้



รูปที่ 1.2 แสดงส่วนประกอบเครื่องเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กำลังแยกสูงโดยวิธีการสะท้อนของบริษัทฟิลิปส์



รูปที่ 1.3 การจัดเรียงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชนิดกระจายมุมโดยใช้วิธีส่งผ่าน ที่ The Daresbury Synchrotron Radiation Source (SRS), UK[2]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลตโดยวิธีการเทียบมาตรฐาน โดยใช้กริด สำหรับพัฒนาต่อไปในการนำไปใช้เพื่อศึกษาโครงสร้างของผลึกผงภายใต้ความดันสูง โดยใช้อิมเมจเพลตเป็นตัวตรวจหาแบบ 2 มิติ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลตในวิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1.3.1 ทำการปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลตโดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด (Grid calibration)

1.3.2 ศึกษาโครงสร้างของสารตัวอย่าง ZnO โดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยใช้อิมเมจเพลตเป็นตัวตรวจจับ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของวิธีการปรับแต่งอิมเมจเพลต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เครื่องอ่านอิมเมจเพลตที่สามารถอ่านข้อมูลจากอิมเมจเพลตแล้วสามารถนำไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างของสารตัวอย่างใดๆ ที่ภาวะความดันบรรยากาศได้

1.4.2 ฐานข้อมูลโครงสร้างและแลตทิซ พารามิเตอร์ ของสารตัวอย่าง ZnO

1.4.3 ข้อมูลของสารตัวอย่าง ZnO ในลักษณะที่เป็นค่าความเข้มกับมุม 2θ สำหรับนำไปใช้หาตำแหน่งของอะตอมภายในเซลล์หนึ่งหน่วยได้

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 6 บทหลักดังนี้ บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึงอิมเมจเพลตซึ่งเป็นตัวตรวจจับที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ บทที่ 4 กล่าวถึงวิธีการทดลองโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวิธีการปรับแต่งอิมเมจเพลต บทที่ 5 แสดงถึงผลการทดลอง และบทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปและอภิปรายผลการวิจัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

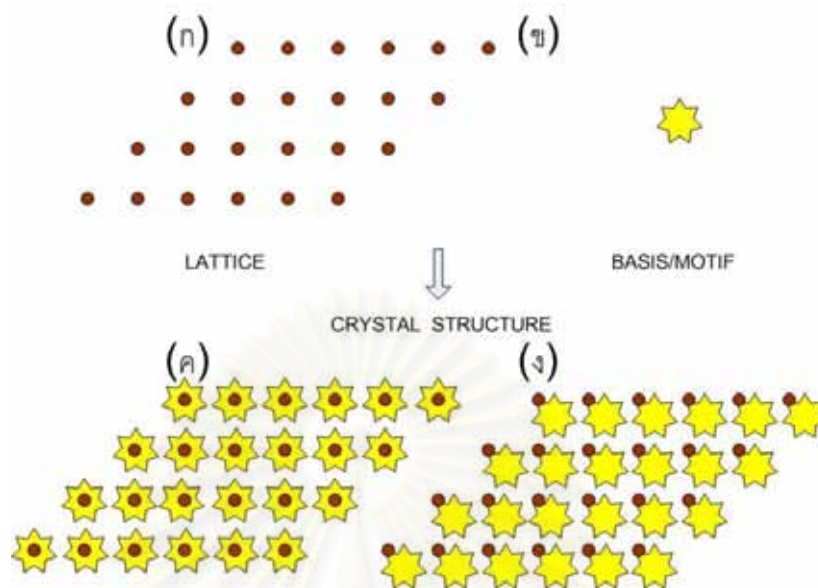
2.1 โครงสร้างผลึก

ผลึกสามารถนิยามในความหมายว่า ผลึกคือ อะตอมเดี่ยวหรือกลุ่มอะตอมของของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นคาบต่อเนื่องกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ โดยที่ผลึกแตกต่างจากของเหลว เพราะการจัดเรียงตัวของของเหลวมีลักษณะที่ไม่เป็นคาบและไม่เป็นระเบียบ อย่างไรก็ตามของแข็งบางประเภทอาจไม่ได้เป็นผลึก ตัวอย่างเช่น แก้ว ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็ง แต่การจัดเรียงตัวของอะตอมไม่ได้มีลักษณะเป็นคาบต่อเนื่องกัน

โครงสร้างผลึก (Crystal Structure) ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ แลตทิซ (Lattice) และเบซิส (Basis) [3]

- 1) แลตทิซ หมายถึง กลุ่มของจุดที่มีการจัดเรียงตัวกันในที่ว่าง (Space) ซ้ำๆ กันอย่างเป็นระเบียบและสม่ำเสมอ โดยเป็นการกำหนดจุดเพื่อที่จะระบุตำแหน่งของเบซิสในที่ว่างนั้น จุดแลตทิซจะมีลักษณะการเรียงตัวได้หลายรูปแบบ โดยถ้าพิจารณาลากเส้นเชื่อมโยงระหว่างจุดแลตทิซ จะได้ลักษณะของเซลล์หนึ่งหน่วย (Unit cell)
- 2) เบซิส หมายถึง อะตอมเดี่ยวหรือกลุ่มของอะตอมที่เรียงตัวอยู่บนจุดแลตทิซ หรือห่างจากจุดแลตทิซเป็นระยะทางคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

รูปร่างของเซลล์หนึ่งหน่วย สามารถมีได้หลายรูปแบบ โดยขึ้นอยู่กับเวกเตอร์ของการเลื่อนตำแหน่ง \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} และค่ามุม α, β, γ ซึ่งระบุตามรูปที่ 2.2 โดยมีสมบัติเบื้องต้นของเซลล์หนึ่งหน่วยในระบบลูกบาศก์ดังแสดงในตารางที่ 2.1

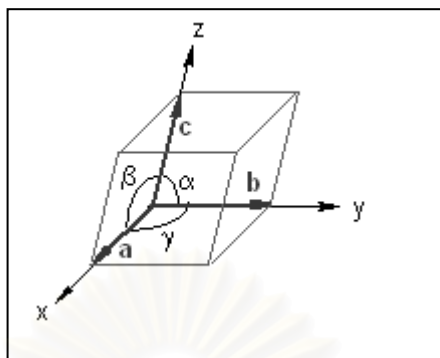


รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึก ซึ่งประกอบด้วย ก) แลตทิซ ข) เบซิส โดยเบซิสจะเรียงตัวได้ 2 แบบ คือ ค) อยู่บนจุดแลตทิซ หรือ ง) อยู่ที่ตำแหน่งห่างจากจุดแลตทิซเป็นระยะทางคงที่[3]

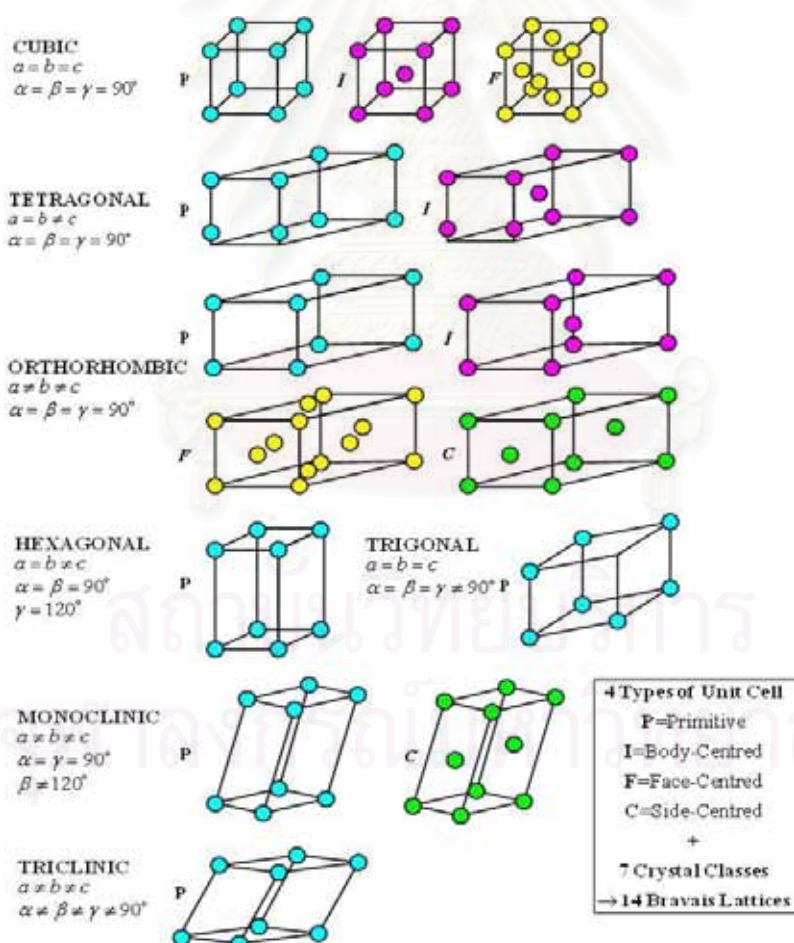
ความหมายของ P หรือ Primitive คือโครงสร้างแบบที่ไม่มีอะตอมอื่นอยู่เลยนอกจากมุมของเซลล์หนึ่งหน่วย I หรือ Body-Centred คือโครงสร้างแบบที่มีอะตอมอยู่ที่มุมทุกมุมและตรงกลางของเซลล์หนึ่งหน่วย F หรือ Face-Centred คือโครงสร้างที่มีอะตอมอยู่ที่มุมทุกมุมและกึ่งกลางของทุกด้านของเซลล์หนึ่งหน่วยและ C หรือ Side-Centred คือโครงสร้างที่มีอะตอมอยู่ที่มุมทุกมุมและด้าน 2 ด้าน โดยสามารถแบ่งระบบของเซลล์หนึ่งหน่วยออกเป็น 7 ระบบและแบ่งรูปแบบทั้งหมด 14 แบบด้วยกันเรียกว่า บราวเวส์ แลตทิซ (Bravais lattice) โดยรูปร่างของเซลล์หนึ่งหน่วยทั้ง 7 ระบบมีดังนี้[1]

- 1) Cubic
- 2) Tetragonal
- 3) Orthorhombic
- 4) Hexagonal
- 5) Monoclinic
- 6) Triclinic
- 7) Trigonal

ซึ่งรูปแบบต่างๆที่กล่าวถึง แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แสดงเวกเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง และมุมระหว่างเวกเตอร์การเลื่อนตำแหน่งในเซลล์หนึ่งหน่วย[1]



รูปที่ 2.3 บราวน์แลตทิซ[1]

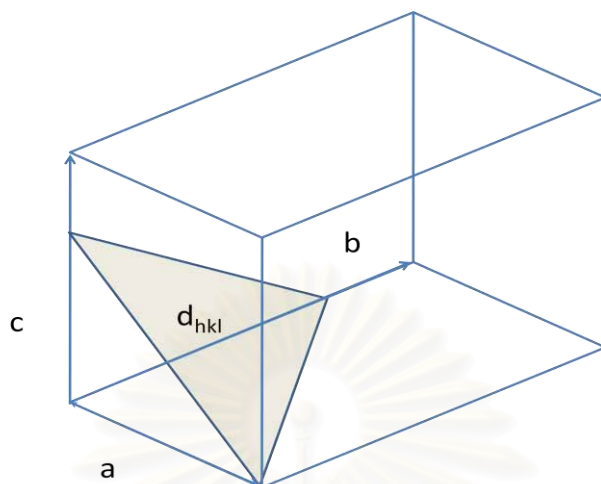
	P	I	F
volum,conventional cell	a^3	a^3	a^3
lattice points per cell	1	2	4
volum,primitive cell	a^3	$(1/2) a^3$	$(1/4) a^3$
lattice points per unit volumn	$1/ a^3$	$2/ a^3$	$4/ a^3$
number of nearest neighbors	6	8	12
nearest-neighbor distance	A	$3^{1/2} a/2$	$a/2^{1/2}$
number of second neighbors	12	6	6
second neighbor distance	$2^{1/2} a$	A	A

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติของบราวน์แลตทิซในระบบลูกบาศก์[4]

2.2 การระบุดัชนีระนาบผลึก

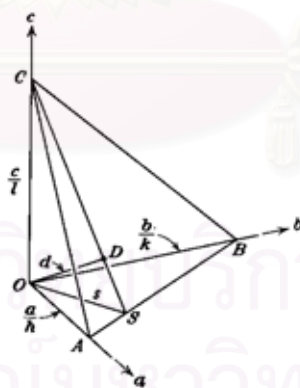
เนื่องจากอะตอมที่จัดเรียงกันอยู่บนแต่ละระนาบภายในโครงสร้างของผลึกนั้นอาจมีความแตกต่างกัน เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการจำแนก จึงต้องมีการระบุดัชนีของระนาบผลึก ในการระบุจะใช้สัญลักษณ์ (hkl) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยค่า hkl จะเป็นจำนวนเต็ม เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ความสัมพันธ์ระหว่างระนาบและมุมที่เลี้ยวเบน

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง d_{hkl} กับระนาบต่างๆ (h k l) ในรูปที่ 2.4 ในเซลล์หนึ่งหน่วย ส่วนค่าของ d_{hkl} เป็นระยะห่างระหว่างระนาบ (Miller indices) ที่ตัดกับเซลล์หนึ่งหน่วย ยกตัวอย่าง orthorhombic cell ดังภาพรูปที่ 2.4 พิจารณาที่ด้านของเซลล์ a, b, และ c พิจารณา ระนาบ (h k l) ตัดกับเซลล์ที่ระยะทาง h ตามแกน a, k ตามแกน b และ l ตามแนวแกน c ตามลำดับ ซึ่งการตัดกันนี้จะเป็นส่วนของด้าน a, b และ c ดังกล่าว

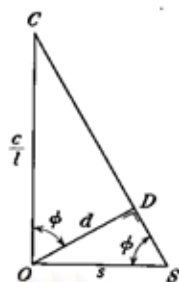


รูปที่ 2.4 ระนาบ (h k l) ที่ตัดกับเซลล์หนึ่งหน่วย

พิจารณาที่รูปที่ 2.5 ที่จุด O ถึงจุด D คือ ระยะระหว่างจุดขอบ (จุดกำเนิด) ด้านหนึ่งของ orthorhombic cell ถึงระนาบ (hkl) ที่ตัดกับเซลล์นั้น



รูปที่ 2.5 \overline{OD} คือ เส้นตรงที่แสดงระยะห่างระหว่างระนาบถึงจุดกำเนิด



รูปที่ 2.6 แสดงสามเหลี่ยม ODS และสามเหลี่ยม ODC เป็นสามเหลี่ยมคล้ายกัน

พิจารณาที่รูปภาพ 2.6 สามเหลี่ยม ODS พบว่าสามเหลี่ยม ODS เป็นสามเหลี่ยมคล้ายกับ ODC สิ่งที่สามารถพิจารณาได้คือ

$$\frac{OS}{OD} = \frac{CS}{OC}$$

จากนั้นแทนค่าความยาวของด้านต่างๆ จะได้

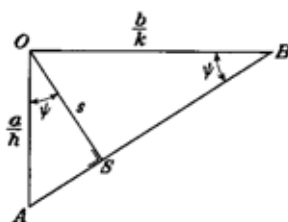
$$\frac{s}{d} = \frac{\sqrt{c^2 + s^2}}{c/l}$$

$$\frac{1}{d} = \frac{l}{cs} \sqrt{c^2 + s^2}$$

$$\frac{1}{d} = \sqrt{\frac{1}{s^2} + \frac{l^2}{c^2}}$$

2.1

จากนั้นพิจารณาที่สามเหลี่ยม ABO ดังรูปที่ 2.7 และสามเหลี่ยม AOS



รูปที่ 2.7 แสดงรูปสามเหลี่ยม ABO กับสามเหลี่ยม AOS เป็นสามเหลี่ยมคล้าย

ได้ความสัมพันธ์ว่า

$$\frac{OA}{OS} = \frac{AB}{OB}$$

จากนั้นแทนค่าความยาวของด้านต่างๆ ลงไป ได้ว่า

$$\frac{a/h}{s} = \frac{\sqrt{b^2 + a^2}}{b/k}$$

$$\frac{1}{s} = \frac{hk}{ab} \sqrt{\frac{b^2 + a^2}{k^2 + h^2}}$$

$$\frac{1}{s} = \sqrt{\frac{h^2 + k^2}{a^2 + b^2}}$$

2.2

จากนั้นนำสมการ (2) ไปแทนค่าสมการ (1) จะได้

$$\frac{1}{d_{hkl}} = \sqrt{\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}}$$

2.3

สมการ 2.3 คือสมการที่แสดงระยะห่างระหว่างระนาบที่ตัดกับเซตทั่วไป ซึ่งมีมุม α, β และ γ

เท่ากับ 90° และสำหรับกรณีอื่นๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

2.3 การศึกษาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

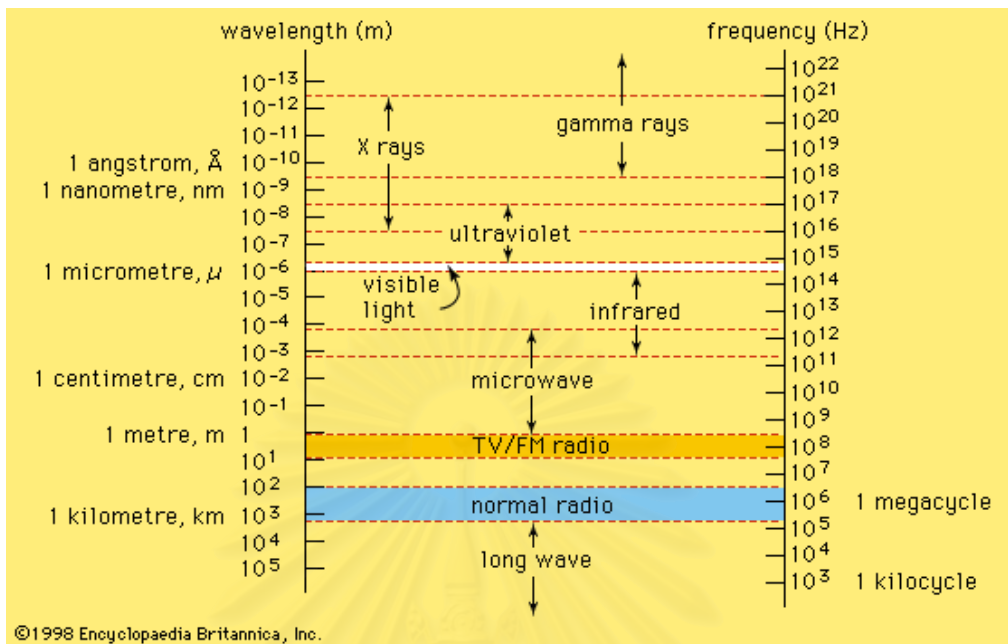
รังสีเอกซ์ (X-ray) ถูกค้นพบโดย Roentgen นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1895 ในตอนต้นสมบัติต่างๆของรังสีเอกซ์ยังคงเป็นปริศนา ทราบแต่เพียงว่ารังสีเอกซ์เดินทางเป็นเส้นตรง และทำปฏิกิริยากับฟิล์มถ่ายภาพเท่านั้น[1]

ถึงแม้ว่านักวิทยาศาสตร์ในอดีตจะยังไม่เข้าใจสมบัติต่างๆของรังสีเอกซ์ แต่ก็มีกรพยายามนำรังสีเอกซ์ไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างของวัตถุโดยวิธีที่เรียกว่าการถ่ายภาพเอกซ์เรย์ (Radiography) จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1912 นักวิทยาศาสตร์พบว่าเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เมื่อฉายรังสีลงบนสารผลึก (Crystal) ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่ารังสีเอกซ์มีสมบัติเป็นคลื่น และสามารถหาโครงสร้างของสารผลึกโดยวิธีการดังกล่าว

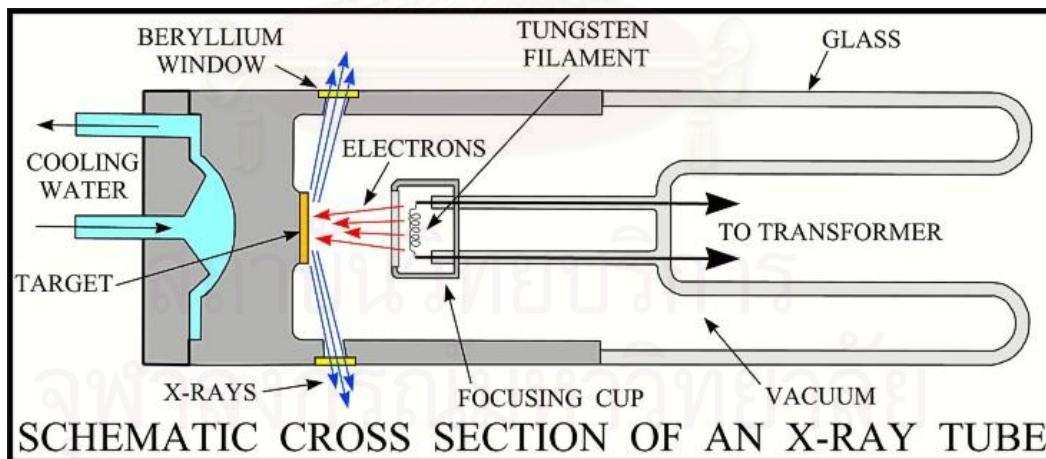
ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ารังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) โดยรังสีเอกซ์มีค่าความถี่อยู่ในช่วง $10^{16} - 10^{21}$ Hz ดังแสดงในรูป 2.8

รังสีเอกซ์เกิดจากประจุไฟฟ้า เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์อย่างรวดเร็ว โดยนิยมใช้อิเล็กตรอน (electron) ในการผลิตรังสีเอกซ์ แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ดังกล่าวเรียกว่า หลอดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน และโลหะซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า (electrodes) ทั้งสองขั้ว รังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นบริเวณที่อิเล็กตรอนเกิดการชน (impact) และแผ่ออกไปทุกทิศทาง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 แสดงค่าความยาวคลื่นในย่านต่างๆของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [5]



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบภายในของหลอดรังสีเอกซ์ [1]

วิธีการผลิตรังสีเอกซ์ภายในหลอดรังสีเอกซ์ เริ่มจากการให้ความร้อนกับลวดที่เป็นไส้ของหลอดไฟ (filament) เพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จากนั้นให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเพื่อให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าไปชนกับเป้าเพื่อให้เกิดรังสีเอกซ์ โดยมีโลหะรูปถ้วย (metal focusing cup) ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังแสดงในรูปที่ 2.9

พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งจนไปกระทบเป้า (target) สามารถหาได้จากสมการ [2.4]

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \quad 2.4$$

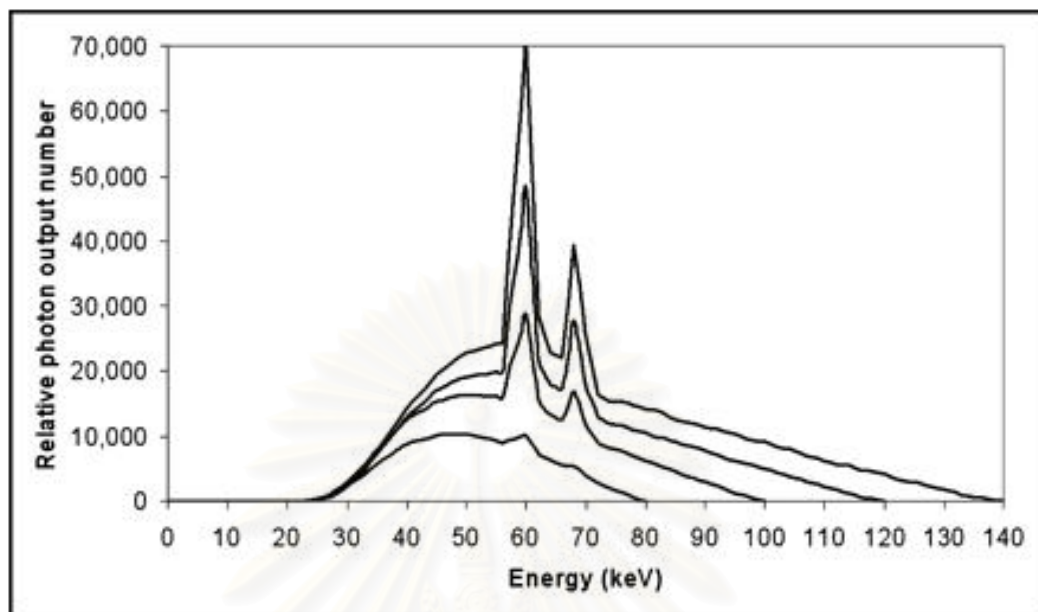
e คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} C

V คือ ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอน

m คือ มวลของอิเล็กตรอน = 9.1×10^{-31} kg

v คือ อัตราเร็วของอิเล็กตรอนขณะกระทบเป้า

โดยพลังงานจลน์ส่วนใหญ่ของอิเล็กตรอน จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นความร้อนมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นรังสีเอกซ์ เมื่อนำรังสีเอกซ์ที่แผ่ออกมาจากเป้าวิเคราะห์จะพบว่าแถบค่าความยาวคลื่น (spectrum) มีค่าต่อเนื่อง (continuous spectrum) รังสีเอกซ์แถบค่าความยาวคลื่นต่อเนื่องนี้เกิดจากการที่อิเล็กตรอนชนกันกับเป้า แต่จะมีค่าความยาวคลื่นบางค่ามีความเข้ม (intensity) มากกว่าปกติ โดยเรียกแถบค่าความยาวคลื่นดังกล่าวว่าแถบค่าความยาวคลื่นลักษณะเฉพาะ (characteristic spectrum) ดังแสดงในภาพที่ 2.10 โดยค่าแถบความยาวคลื่นที่มีลักษณะเฉพาะนี้ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนวิ่งไปชนกับอิเล็กตรอนภายในอะตอมของเป้าทำให้อะตอมของเป้าอยู่ในภาวะถูกกระตุ้น (excited state) ทำให้อะตอมคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์เพื่อที่กลับไปอยู่ในสถานะพื้น โดยแถบค่าความยาวคลื่นลักษณะเฉพาะดังกล่าวนี้ ขึ้นอยู่กับประเภทของโลหะที่นำมาใช้เป็นเป้าโดยโลหะต่างชนิดกันจะให้แถบค่าความยาวคลื่นลักษณะเฉพาะต่างกันด้วย



รูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากเป้าทังสแตนโดยใช้ค่าพลังงานในการเร่งอิเล็กตรอนเป็น 80,100,120 และ 140 keV[6]

ในการพิจารณาสมบัติของสารโดยใช้รังสีเอกซ์ วิธีการหนึ่งซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการศึกษาสมบัติของสารโดยทำการส่งผ่านสารนั้นด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาถึงค่าความเข้มที่ถูกดูดกลืนไปโดยอิเล็กตรอนภายในอะตอมของสารนั้น โดยการจัดเรียงของอุปกรณ์ของการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านมาจากสารตัวอย่างจะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความหนาของสารนั้น โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ว่า

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad 2.5$$

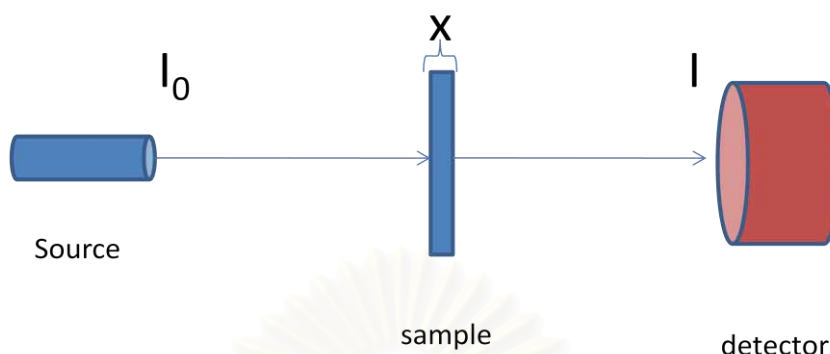
โดย

I_x คือ ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ส่งผ่านสารตัวอย่าง

I_0 คือ ค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (linear absorption coefficient)

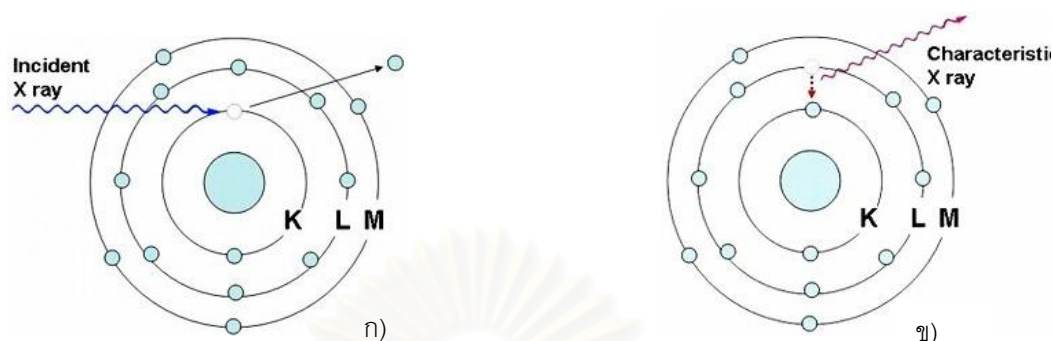
x คือ ค่าความหนาของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพการทดลองเพื่อวัดการดูดกลืนของรังสีเอกซ์โดยสารตัวอย่าง

ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ถูกดูดกลืน จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยรังสีเอกซ์ที่ถูกดูดกลืนนั้นเกิดจาก 2 ส่วน คือ ส่วนที่เกิดจากการกระเจิง (scattering) โดยสารตัวอย่าง และส่วนที่เกิดการดูดกลืนโดยแท้จริง (True absorption) โดยในหัวข้อนี้จะสนใจในส่วนที่ถูกดูดกลืนโดยแท้จริงเท่านั้น ส่วนของการกระเจิงจะได้มีการอธิบายในหัวข้อถัดไป

การดูดกลืนรังสีเอกซ์เนื่องจากอะตอมของสารนั้น สามารถอธิบายได้โดยการพิจารณารังสีเอกซ์ที่มาตกกระทบกับสารตัวอย่าง เป็นอนุภาคที่มีค่าพลังงานตามสมการ $E = h\nu$ ซึ่งเมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับอะตอมของสารตัวอย่าง ถ้าพลังงานของรังสีเอกซ์ดังกล่าวมีค่ามากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนภายในสารนั้น จะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้หลุดออกมา และทำให้อะตอมดังกล่าวอยู่ในภาวะไม่เสถียร อิเล็กตรอนภายในอะตอมจะคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์เพื่อให้อะตอมกลับสู่สถานะพื้น ซึ่งพลังงานที่อิเล็กตรอนคายออกมดังกล่าวจะมีค่าไม่ต่อเนื่อง คล้ายกันกับแถบค่าความยาวคลื่นลักษณะเฉพาะในกระบวนการเกิดของรังสีเอกซ์ โดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.12

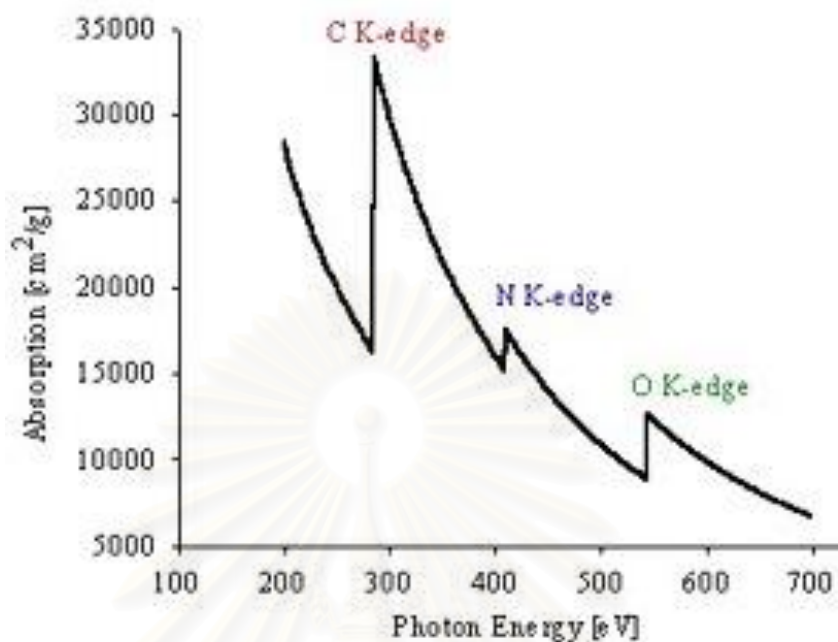


รูปที่ 2.12 ก) รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร
 ข) อิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่ โดยคายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ
 ออกมา[6]

ในการพิจารณาการดูดกลืนรังสีเอกซ์โดยอะตอมจะพิจารณา สมการที่ 2.6 ในอีกรูปแบบ
 หนึ่ง คือ

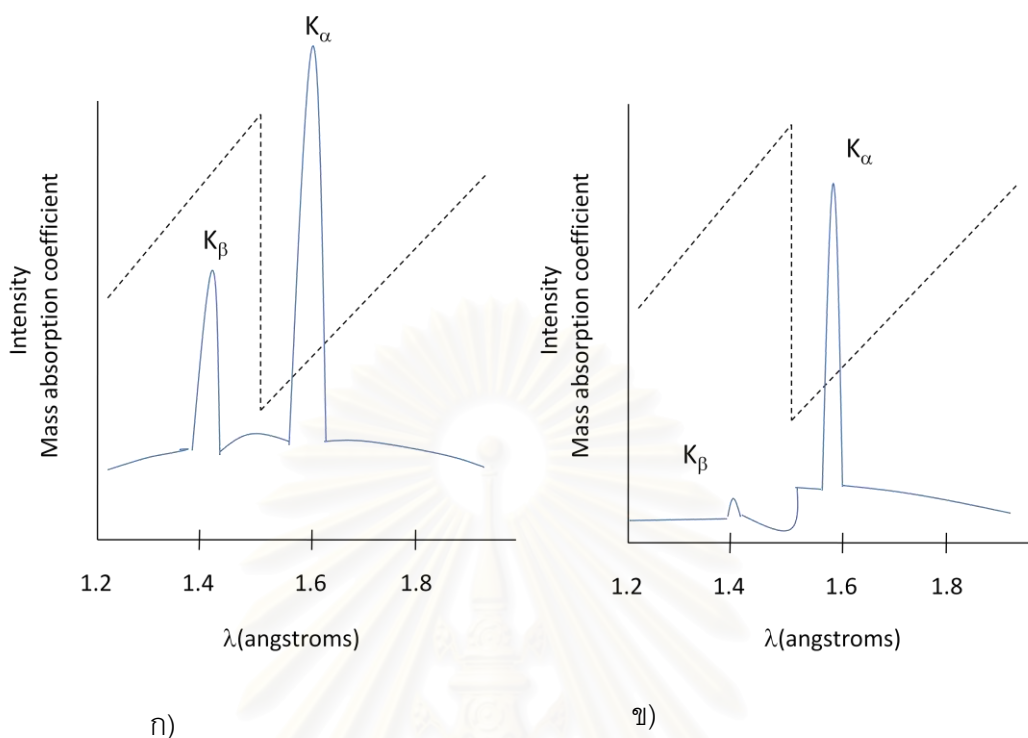
$$I_x = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho x} \quad 2.7$$

ค่า $\frac{\mu}{\rho}$ เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (mass absorption coefficient) ซึ่งเป็นค่าคงที่ของสารนั้น ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับสถานะทางกายภาพ (physical state) ดังนั้นในการพิจารณา ค่าความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของสารนั้น จะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบกับสารตัวอย่างและเลขอะตอมของสารนี้เอง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าในการดูดกลืนของรังสีเอกซ์โดยสารตัวอย่าง จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ กล่าวคือเมื่อค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ มีค่าใกล้เคียงกันกับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนภายในอะตอมของสาร ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลจะมีค่าสูง ซึ่งจะทำให้กราฟระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลกับค่าพลังงานของรังสีเอกซ์มีลักษณะเป็นขอบ เรียกว่าขอบของการดูดกลืน (absorption edge) ซึ่งเป็นค่าที่ตรงกันกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนนั่นเอง โดยตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลและค่าขอบของการดูดกลืนในระดับพลังงาน K ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและค่าขอบของการดูดกลืนของคาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน[6]

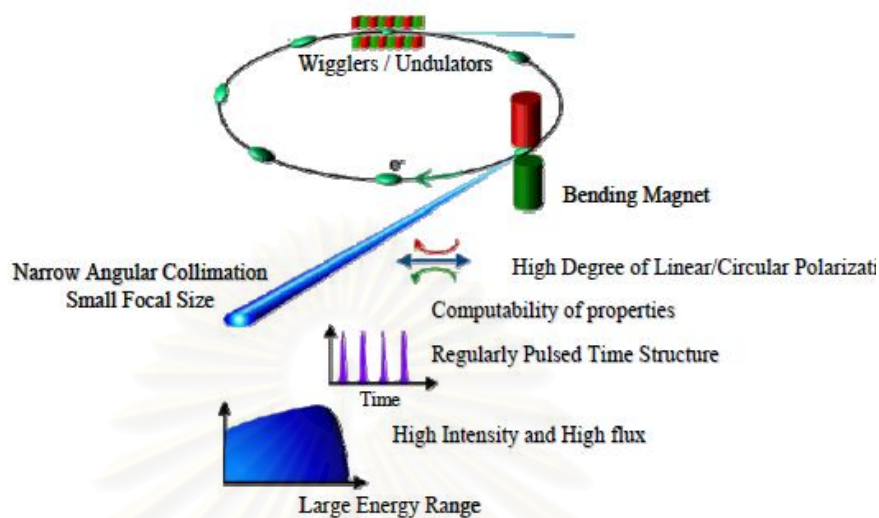
ค่าขอบของการดูดกลืนมีประโยชน์อย่างยิ่งในการช่วยในการคัดแยก ค่าความยาวคลื่นหรือค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ เนื่องจากในกระบวนการการผลิตรังสีเอกซ์ ซึ่งจะให้ค่าความยาวคลื่นออกมาหลายค่า และในแถบค่าความยาวคลื่นเฉพาะในบางกรณีจะให้ค่าความยาวคลื่นออกมาใกล้เคียงกันมากเช่นในกรณีของ K_{α} และ K_{β} ซึ่งถ้านำรังสีเอกซ์ที่ไม่ได้ทำการคัดแยกไปใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกอาจทำให้เกิดการผิดพลาดได้ วิธีการในการคัดแยกดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้สารที่มีค่าขอบของการดูดกลืนที่เหมาะสม มาดูดกลืนรังสีเอกซ์ในส่วนที่มีค่าความยาวคลื่นที่ไม่ต้องการออกไปโดยสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.14 นอกจากนี้การพิจารณาการดูดกลืนของรังสีเอกซ์ ยังมีประโยชน์ในการตรวจสอบค่าพลังงานหรือค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่มีแหล่งกำเนิดจากแสงซินโครตรอนซึ่งจะได้อธิบายอีกครั้งในบทที่ 4



รูปที่ 2.14 แสดงแถบค่าความยาวคลื่นที่ได้จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้คอปเปอร์เป็นเป้า ก)

ก่อนและ ข) หลังจากผ่านนิกเกิลที่ใช้เป็นตัวคัดแยก เส้นประคือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของนิกเกิล[1]

นอกจากการใช้หลอดรังสีเอกซ์เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ดังที่แสดงไว้ข้างต้น ยังมีวิธีการให้กำเนิดรังสีเอกซ์อีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งนำมาใช้ในงานวิจัยขั้นนี้ นั่นคือการใช้รังสีเอกซ์ที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron Radiation Source) โดยรังสีเอกซ์ที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนนั้น เกิดจากการแผ่รังสีเนื่องจากอิเล็กตรอนพลังงานสูงภายในวงแหวนการเก็บ (storage ring) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.15 ถูกทำให้มีความเร่ง โดยรังสีที่แผ่ออกมาจะมีค่าพลังงานในลักษณะที่ต่อเนื่องตั้งแต่ในย่านของอินฟราเรด (infrared) จนถึงรังสีเอกซ์พลังงานสูง (hard X-rays) ในปัจจุบันรังสีเอกซ์ที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนได้นำไปใช้อย่างหลากหลายเนื่องจากสมบัติของแสงซินโครตรอนต่างๆ ดังนี้ 1) มีขนาดของลำรังสีที่ค่อนข้างเล็ก 2) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมามีค่าพลังงานกว้างและมีความเข้มสูง 3) รังสีที่แผ่ออกมามีลักษณะเป็นจังหวะสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเวลา

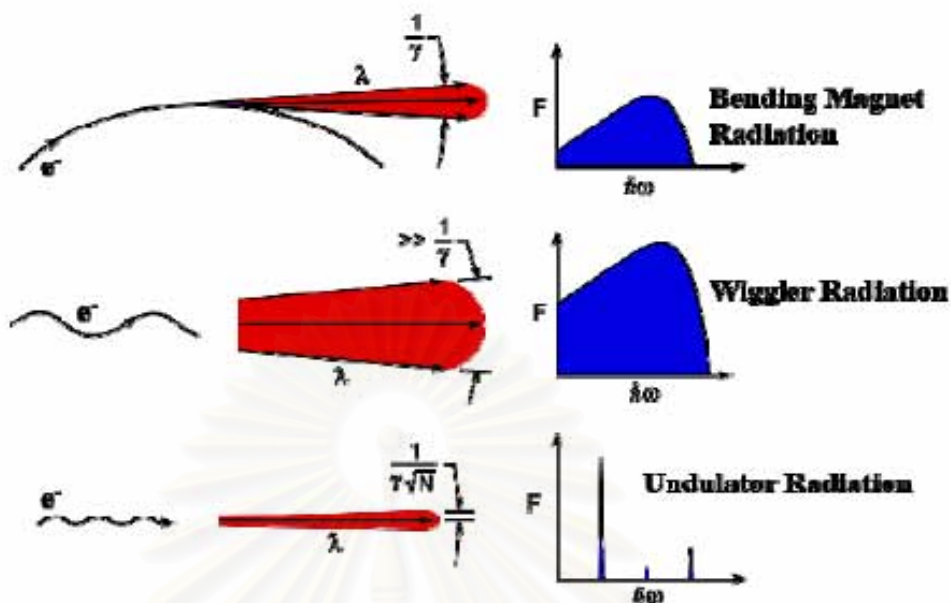


รูปที่ 2.15 แสดงแผนผังของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ในย่าน GeV โดยตัวเร่งอิเล็กตรอนและถูกทำให้งอโดยแม่เหล็กเบนดิ่ง และ แม่เหล็กตัวแกว่งหรือแม่เหล็กตัวกระเพื่อมภายในวงแหวนการเก็บ[7]

แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนสามารถแบ่งอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการแผ่รังสีออกได้เป็น 3 ประเภทตามจำนวนและความแรงของแม่เหล็ก

1. แม่เหล็กเบนดิ่ง (Bending magnet) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วยแม่เหล็กชั่วคราวและได้หันหน้าเข้าหากัน รังสีที่แผ่ออกมาจากเบนดิ่ง แมกเนตจะมีลักษณะการกระจายตัวแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution)
2. แม่เหล็กตัวแกว่ง (Wiggler magnet) เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วยคู่ของแม่เหล็กแรงสูงที่เรียงต่อกันในแนวตรง รังสีที่แผ่ออกมาจากวิกเกิลเลอร์จะมีลักษณะต่อเนื่องและมีค่าความกว้างมากกว่ารังสีที่ออกมาจากเบนดิ่ง แมกเนต
3. แม่เหล็กตัวกระเพื่อม (Undulator magnet) เป็นอุปกรณ์ที่คล้ายกับตัวแกว่งเพียงแต่ความแรงแม่เหล็กจะอ่อนกว่าและมีจำนวนของคู่แม่เหล็กที่เยอะกว่า รังสีที่แผ่ออกมาจากตัวกระเพื่อมจะมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากรังสีดังกล่าวจะเกิดการแทรกสอดกัน

แถบรังสีที่ได้จากอุปกรณ์ทั้ง 3 ประเภทแสดงดังรูปที่ 2.16

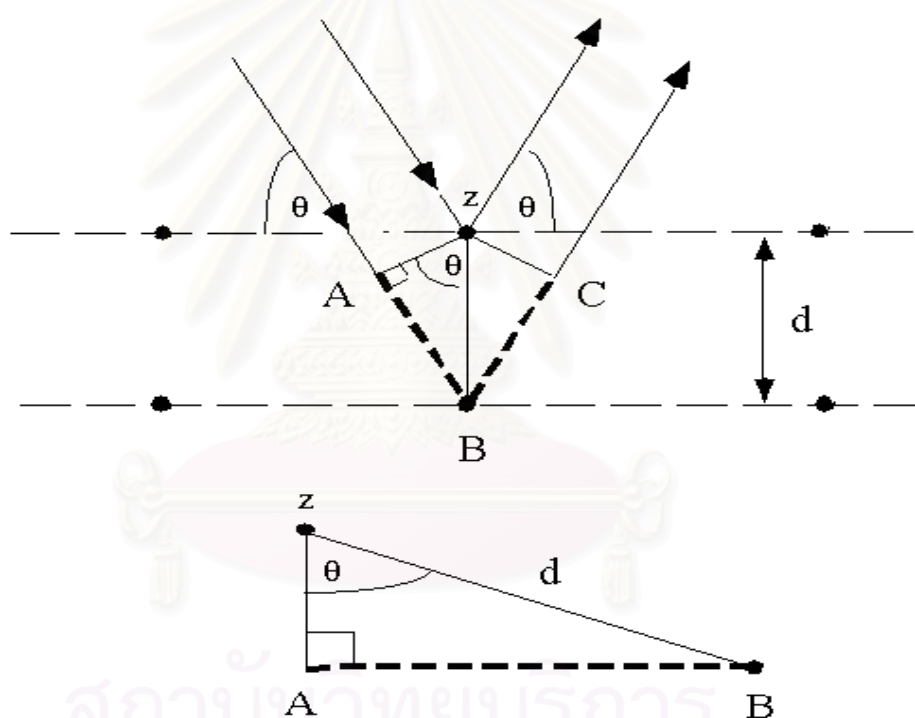


รูปที่ 2.16 แสดงแถบค่าพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ภายในแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน ทั้ง 3 ประเภท[7]

2.4 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นการ ใช้สมบัติความเป็นคลื่นของรังสีเอกซ์ซึ่งสามารถแทรกสอดและเลี้ยวเบนได้ ซึ่งเป็นที่นิยมมากในการนำไปศึกษาโครงสร้างของผลึก โดยอาศัยสมบัติการเป็นคลื่นของรังสีเอกซ์ ดังกล่าว เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผลึกจะเกิดการเลี้ยวเบนเพราะอิเล็คตรอนของอะตอมในผลึกสั่นเนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และ คายพลังงานออกมา ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความถี่ค่าเดียวกับกับรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบ หรือกล่าวได้ว่าอิเล็คตรอนในอะตอมจะทำหน้าที่ เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ความถี่เดียวกับกับรังสีเอกซ์ที่เข้ามาตกกระทบภายในอะตอม

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับอะตอมซึ่งจัดเรียงตัวกันอยู่บนระนาบของโค รงผลึก อิเล็กตรอนภายในอะตอมเหล่านี้จะถูกรังสีเอกซ์กระตุ้นให้เกิดการสั่น ในความถี่เดียวกันกับรังสีเอกซ์ที่มาตกกระทบและอิเล็กตรอนดังกล่าวจะคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ในทุกทิศทาง ทำให้ดูเหมือนว่ารังสีเอกซ์ตกกระทบลงบนระนาบแล้วเกิดการสะท้อน โดยถ้าระยะห่างระหว่างระนาบเป็น d ให้รังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบที่จุด A และ C เป็นมุม θ แล้วสะท้อนออกมาจากระนาบเป็นมุม θ เท่าเดิม มุม θ ดังกล่าวเรียกว่ามุมของแบรกก์ (Bragg angle) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 [1]



รูปที่ 2.17 แสดงภาพรังสีเอกซ์กระเจิงจากระนาบของผลึก โดยเงื่อนไขในการเลี้ยวเบนขึ้นอยู่กับผลต่างทางเดินของรังสีเอกซ์

หน้าคลื่นของรังสีเอกซ์ซึ่งสะท้อนจากระนาบที่ต่างกัน จะทำให้เกิดความแตกต่างของระยะทางเดินคลื่นเท่ากับ $BC + CD$ หรือ เท่ากับ $2d \sin \theta$ ในกรณีที่เกิดการเสริมกันของคลื่นแล้ว จะมีค่าเป็น n เท่า ของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังสมการ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad 2.5$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ ตามลำดับเงื่อนไขดังกล่าวนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg law)

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึก

จากความรู้ทางผลึกวิทยา (Crystallography) ซึ่งพิจารณาว่าผลึกจะประกอบไปด้วยระนาบชุดต่างๆมากมาย ซึ่งสามารถเขียนสัญลักษณ์แทนระนาบแต่ละชุดดังกล่าวได้ด้วยรูปแบบดังนี้ คือ h, k, l โดย h, k, l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ $0, 1, 2, \dots$ ซึ่งเรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันนั้นจะขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์ และค่าคงที่ของโครงผลึก ($a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของระบบผลึก (crystal system) แบบต่างๆสามารถหาได้จากหนังสือเกี่ยวกับ เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยทั่วไป [1,3]

ตัวอย่างเช่นสำหรับผลึกที่อยู่ในระบบเทตระโกนอล (tetragonal system , $a = b \neq c$,

$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) พบว่ามีความสัมพันธ์ดังนี้ [3]

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad 2.6$$

และถ้าเรานำสมการของแบรกก์มารวมกันกับสมการดังกล่าวนี้จะได้ความสัมพันธ์

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad 2.7$$

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาค่าคงที่ของผลึก (a , c) เมื่อเราทราบค่าของมุมแบรกก์ (θ) ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมวลเลข (h , k , l)

2.6 การกระเจิงของรังสีเอกซ์โดยอิเล็กตรอน

รังสีเอกซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ซึ่งมีความแรง (strength) เป็นไปในสถานะรูปคลื่นของฟังก์ชันไซน์ (sinusoidal) เมื่อสนามไฟฟ้าวิ่งผ่านมาถึงอิเล็กตรอน จะส่งผลทำให้เกิดแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ากระทำบนอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่แบบสั้นรอบตำแหน่งสมดุล การสั่นดังกล่าวทำให้อิเล็กตรอนปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปในทุกทิศทาง โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมา จะมีค่าความยาวคลื่นและความถี่ตรงกับรังสีเอกซ์ที่มาตกกระทบ เรียกกระบวนการทั้งหมดว่า “การกระเจิงของรังสีเอกซ์โดยอิเล็กตรอน” [1]

ถึงแม้ว่าอิเล็กตรอนกระเจิงรังสีเอกซ์ออกมาในทุกทิศทาง แต่ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจะขึ้นอยู่กับมุมของการกระเจิง (angle of scattering) ซึ่ง เจ.เจ. ทอมป์สัน (J.J. Thomson) [1] ได้รายงานไว้ว่า ความเข้ม I ของลำรังสีที่กระเจิงเนื่องมาจากอิเล็กตรอนที่มีค่าประจุ e คูลอมป์ และมีมวล m ที่ระยะทาง r เมตร จากอิเล็กตรอน สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} I &= I_0 \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{e^4}{m^2 r^2}\right) \sin^2 \alpha \\ &= I_0 \frac{K}{r^2} \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad 2.8$$

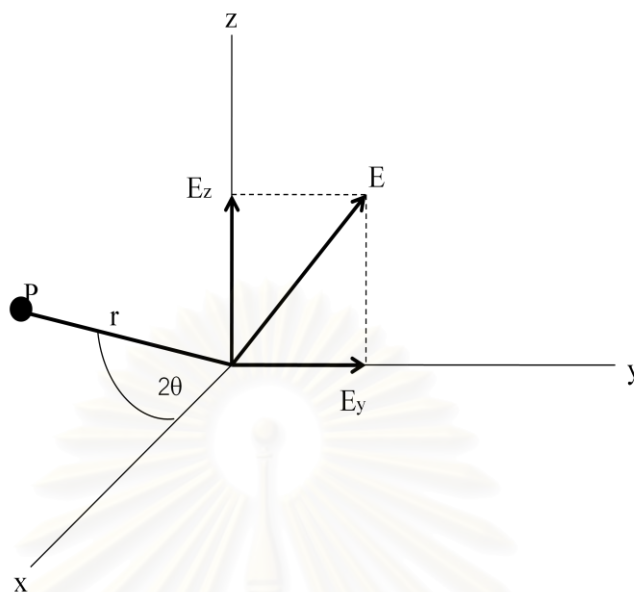
เมื่อ I_0 คือ ค่าความเข้มของรังสีที่มาตกกระทบ

μ_0 คือ ค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{C}^{-2}$

K คือ ค่าคงที่

α คือ มุมระหว่างทิศทางของการกระเจิงกับทิศทางของความเร่งของ

อิเล็กตรอน



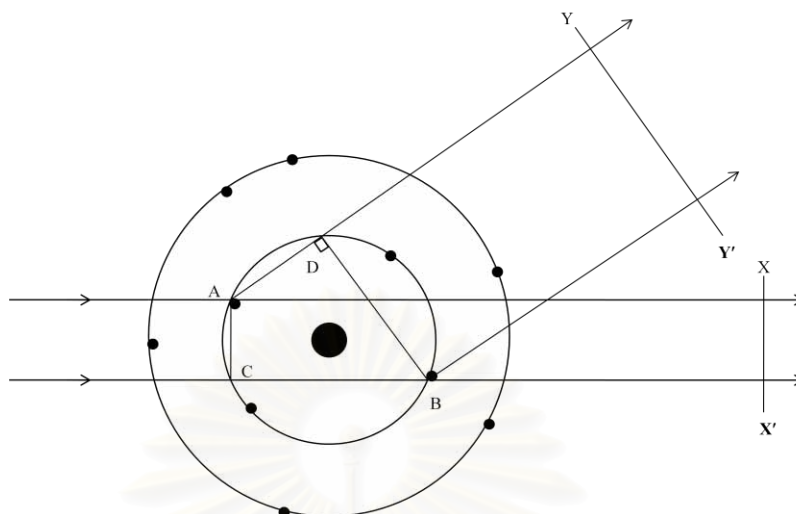
รูปที่ 2.18 แสดงการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากอิเล็กตรอนหนึ่งตัวซึ่งค่า I จะขึ้นอยู่กับมุม θ

จากสมการจะเห็นได้ว่า ค่าความเข้ม I ขึ้นอยู่กับทิศทางของการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากอิเล็กตรอน ดังนั้นในการคำนวณหาความเข้มของรังสีเอกซ์ จึงจำเป็นต้องมี ส่วนที่เรียกว่า “ตัวประกอบโพลาไรเซชัน” (polarization factor) ดังแสดงในรูป 2.18

2.7 การกระเจิงของรังสีเอกซ์โดยอะตอม

เมื่อรังสีเอกซ์เดินทางเข้าไปใกล้กับอะตอม รังสีเอกซ์จะเกิดการกระเจิงเนื่องจากอิเล็กตรอนภายในอะตอม รังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจะแทรกสอดกันตามสมการของ Thomson นิวเคลียสของอะตอมจะไม่ทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีเอกซ์ เพราะนิวเคลียสมีมวลมากเมื่อเทียบกับมวลของอิเล็กตรอน ซึ่งสังเกตได้จากสมการของ Thomson ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงจะแปรผกผันกับมวลยกกำลังสอง ทำให้สามารถสรุปได้คร่าวๆว่า การกระเจิงของรังสีเอกซ์เนื่องจากอะตอมจะพิจารณาเฉพาะส่วนของอิเล็กตรอนภายในอะตอมเท่านั้น

ในความเป็นจริงแล้วอิเล็กตรอนของอะตอมจะเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบรอบๆนิวเคลียส ซึ่งทำให้รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอนเหล่านี้เกิดการต่างเฟสขึ้น ซึ่งมีผลต่อการแทรกสอดของรังสีเอกซ์หลักจากการกระเจิงการอิเล็กตรอน พิจารณาจากรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงภาพการกระเจิงของรังสีเอกซ์จากอะตอม

อิเล็กตรอนเรียงตัวอย่างกระจัดกระจายรอบนิวเคลียส รังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากอิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง A และ B จะมีเฟสตรงกันในหน้าคลื่น XX' เพราะรังสีเอกซ์เดินทางเป็นระยะทางที่เท่ากัน ซึ่งถ้าลองพิจารณารังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากอิเล็กตรอน A และ B ในทิศทางอื่น จะพบว่า มีผลต่างของทางเดินแสงเท่ากับ $CB-AD$ ทำให้รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงดังกล่าว มีเฟสไม่ตรงกันในหน้าคลื่น YY'

จากเหตุผลข้างต้น จึงนิยามปริมาณหนึ่งขึ้นมาเพื่อที่จะอธิบายถึงประสิทธิภาพในการกระเจิงรังสีเอกซ์ของอะตอมในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ปริมาณดังกล่าวคือ “แฟกเตอร์การกระเจิงของอะตอม” (atomic scattering factor) นิยามโดย

$$f = \frac{\text{แอมพลิจูดของคลื่นที่กระเจิงเนื่องจากอะตอม}}{\text{แอมพลิจูดของคลื่นที่กระเจิงเนื่องจากอะตอม}}$$

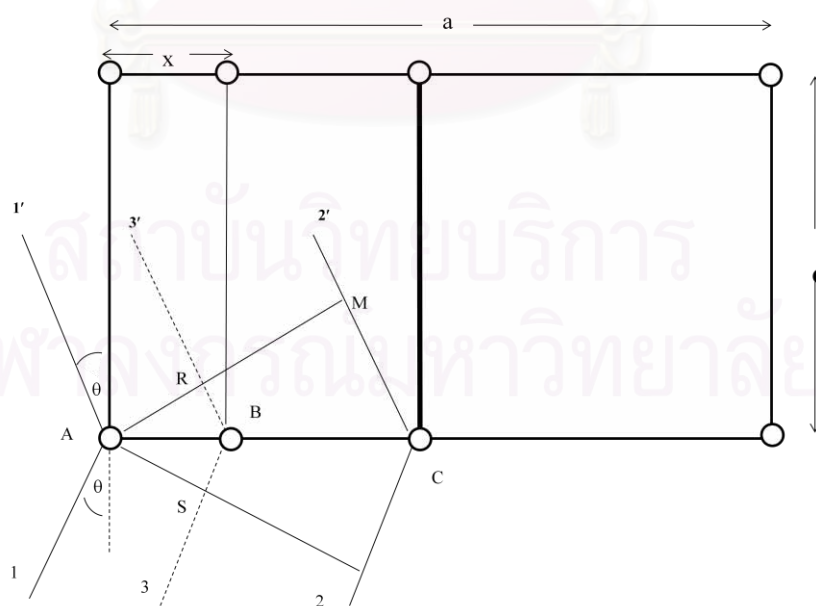
พิจารณาอะตอมของธาตุที่มีเลขอะตอม เท่ากับ Z ในกรณีที่เกิดการกระเจิงในทิศทางที่ $2\theta = 0$ จะได้ว่า $f = Z$ นั่นเอง

2.8 การกระเจิงของรังสีเอกซ์เนื่องจากเซลล์หนึ่งหน่วย (Unit cell)

เพื่อที่จะพิจารณาค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบน จะต้องพิจารณารังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงที่เฟสตรงกันและไม่เพียงแค่ว่าสำหรับอะตอมตัวเดียวเท่านั้น จะต้องพิจารณาทุกๆ อะตอมที่ประกอบเป็นผลึก ในความเป็นจริงแล้ว อะตอมจะจัดเรียงตัวกันเป็นคาบ ซึ่งบ่งว่า รังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมานั้น จะมีทิศทางที่ค่อนข้างจำกัด โดยทิศทางของรังสีเอกซ์จะถูกจำกัดโดยกฎของแบรกก์

คล้ายคลึงกับการพิจารณากการกระเจิงของรังสีเอกซ์โดยอะตอมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว รังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากแต่ละอะตอมภายในหน่วยเซลล์ จะมีเฟสไม่ตรงกัน ยกเว้นในกรณีที่ $2\theta = 0$ ซึ่งในตอนนี้จะมาพิจารณาว่าเฟสดังกล่าวเกี่ยวข้องกับอย่างไรกับการจัดเรียงตัวในหน่วยเซลล์ ปัญหาการพิจารณาค่าความต่างเฟสดังกล่าว จะเริ่มพิจารณาดังนี้ (แสดงดังรูปที่ 2.20)

พิจารณาอะตอม A เป็นจุดกำเนิด และรังสีเอกซ์เกิดการเลี้ยวเบนจากระนาบ (h00) หมายความว่า การแทรกสอดและเลี้ยวเบนต้องตรงกับเงื่อนไขของแบรกก์ ถ้าลองพิจารณาผลต่างทางเดินแสงระหว่าง $2'$ และ $1'$ จะได้ว่า



รูปที่ 2.20 แสดงการกระเจิงของรังสีเอกซ์เนื่องจากระนาบของผลึกภายในเซลล์หนึ่งหน่วย

$$\begin{aligned}
 \delta_{2'1'} &= MCN \\
 &= 2d_{h00} \sin\theta \\
 &= \lambda
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

จากนิยามของมิลเลอร์

$$\begin{aligned}
 d_{h00} &= AC \\
 &= \frac{a}{h}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

ลองพิจารณารังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากอะตอม B ที่อยู่ห่างจากอะตอม A เป็นระยะ X จะพิจารณาว่าระยะ (h00) ตรงตามเงื่อนไขของแบรกก์ ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \delta_{3'1'} &= RBS \\
 &= \frac{AB}{AC} \lambda \\
 &= \frac{X}{a/h} \lambda
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

ในกรณีที่ทางเดินแสงต่างกันความยาวคลื่น (λ) จะมีค่าต่างกัน 2π rad ถ้าในกรณีที่ทางเดินแสงต่างกัน δ จะมีเฟสต่างกัน ϕ กล่าวคือ

$$\phi = \frac{\delta}{\lambda} 2\pi
 \tag{2.12}$$

ดังนั้นความต่างเฟสของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงของอะตอม B และ A หาได้จาก

$$\begin{aligned}
 \phi_{3'1'} &= \frac{\phi_{3'1'}}{\lambda} 2\pi \\
 &= \frac{2\pi hX}{a}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

ถ้าตำแหน่งของอะตอม B ระบุโดย fractional coordinate $u = \frac{x}{a}$ ดังนั้น ผลต่างเฟสจะมีค่า

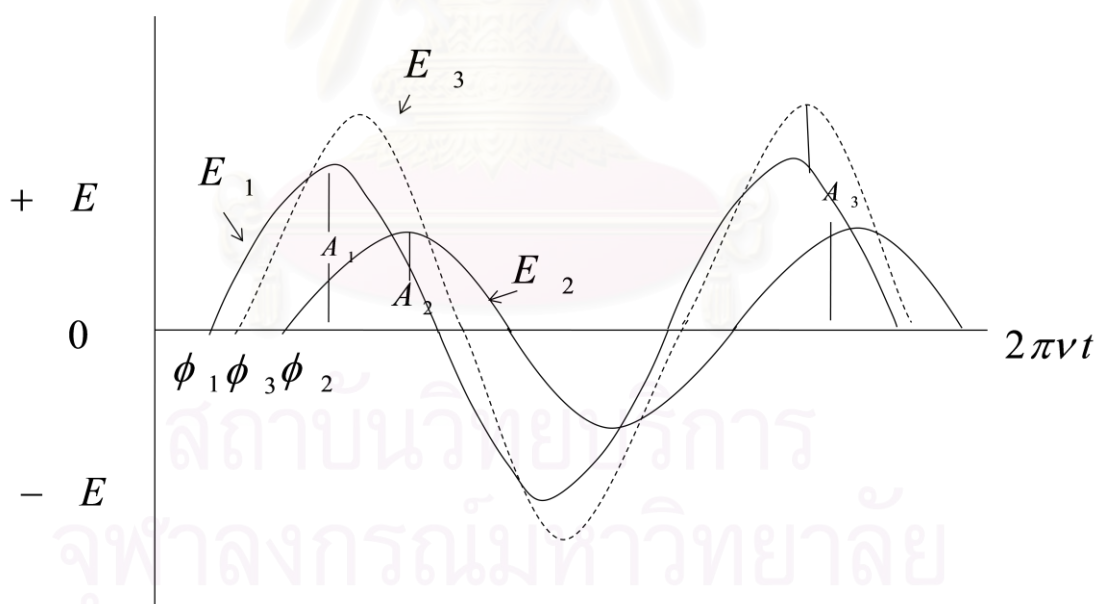
$$\phi_{3'1'} = 2\pi hu
 \tag{2.14}$$

การพิจารณาดังกล่าวสามารถกล่าวขยายไปในกรณีสามมิติ ถ้าอะตอม B มีพิกัดเป็น x, y, z หรือใน fractional coordinate เป็น $\frac{x}{a}, \frac{y}{b}, \frac{z}{c}, u v w$ จะได้ผลต่างเฟสจากอะตอม A เป็น

$$\phi = 2\pi(hu + kv + lw) \quad 2.15$$

คลื่นรังสีเอกซ์ที่เกิด การเลี้ยวเบนอาจแตกต่างกันทั้งค่ามุมเฟสและค่าแอมพลิจูด ถ้าอะตอมที่ตำแหน่ง B กับอะตอมที่ตำแหน่ง A เป็นคนละชนิดกัน ในกรณีนี้ค่าแอมพลิจูดจะขึ้นอยู่กับค่าแฟกเตอร์การกระเจิงของอะตอม

ในตอนนี้จะเห็นได้ว่า สามารถพิจารณาการกระเจิงของรังสีเอกซ์ เนื่องจากหน่วยเซลล์เป็นการกระเจิงจากทุกๆ อะตอมในหน่วยเซลล์ซึ่งจะมารวมกันโดยมีเฟสและค่าแอมพลิจูดที่ต่างกัน ดังนั้นจึงต้องพิจารณาคลื่นที่มาวมกันดังกล่าว วิธีการพิจารณาดรวมของคลื่นรังสีเอกซ์ สามารถทำได้โดยเขียนคลื่นรังสีเอกซ์ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงการพิจารณาการรวมกันของคลื่นรังสีเอกซ์ในรูปของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 2.21 แสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเวลาของคลื่นสองคลื่น ซึ่งมีหน้าคลื่นในทิศเดียวกันกับรังสีเอกซ์ โดยสามารถเขียนสมการคลื่นได้ดังนี้

$$E_1 = A_1 \sin(2\pi vt - \phi_1) \quad 2.16$$

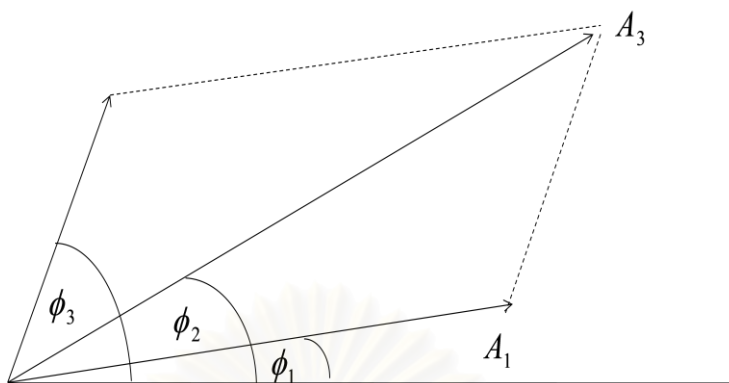
$$E_2 = A_2 \sin(2\pi vt - \phi_2) \quad 2.17$$

คลื่นทั้งสองมีความถี่ (ν) เท่ากัน หรืออาจกล่าวได้ว่ามีความยาวคลื่นเท่ากัน แต่แตกต่างกันในส่วนของคุณค่าแอมพลิจูด (A) และค่ามุมเฟส (ϕ) เส้นประใน รูปที่ 2.21 แสดงถึงผลรวมของคลื่น E_3 ซึ่งยังมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ แต่มีมุมเฟสและแอมพลิจูดเปลี่ยนไป คลื่นที่แตกต่างกันในค่าแอมพลิจูดและค่ามุมเฟส สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังรูป ที่ 2.22 แต่ส่วนประกอบของคลื่นแสดงได้ด้วยเวกเตอร์ ส่วนแอมพลิจูดของคลื่นแสดงค่าได้โดยค่าความยาวของเวกเตอร์ มุมเฟสแสดงได้ด้วยมุมที่เวกเตอร์กระทำกับแกนเอกซ์ อย่างไรก็ตามสามารถหลีกเลี่ยงวิธีการรวมคลื่นแบบใช้เรขาคณิต โดยการเขียนเวกเตอร์ให้อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน ($a+bi$) จากความสัมพันธ์

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad 2.18$$

$$Ae^{i\phi} = A \cos \phi + Ai \sin \phi \quad 2.19$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนคลื่นรังสีเอกซ์ให้อยู่ในรูปของเอกซ์โพเนนเชียลฟังก์ชันได้



รูปที่ 2.22 แสดงการรวมกันของคลื่นรังสีเอกซ์ในรูปของเวกเตอร์

เนื่องจากรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง จึงสามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการคลื่นได้ กล่าวคือ

$$E = Ae^{i(2\pi vt - \phi)} \quad 2.20$$

เมื่อ v คือ ความถี่ของคลื่น

ϕ คือ มุมเฟส

ดังนั้นรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงจากแต่ละอะตอมในหน่วยเซลล์ แล้วเกิดการเลี้ยวเบนมาแทรกสอดกัน อาจเขียนได้ว่า

$$Ae^{i\phi} = fe^{2\pi i(hu + kv + lw)} \quad 2.21$$

โดยผลลัพธ์ของคลื่นที่กระเจิงออกมาจากทุกอะตอมภายในหน่วยเซลล์ จะเรียกว่า แฟกเตอร์โครงสร้าง (structure factor) แฟกเตอร์โครงสร้างดังกล่าวเป็นตัวอธิบายว่าอะตอมจัดเรียงตัวอย่างไรภายในหน่วยเซลล์ [1]

$$F_{hkl} = \sum_1^N f_n e^{2\pi i(hu_n + kv_n + lw_n)} \quad 2.22$$

ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนจากอะตอมในหน่วยเซลล์ที่คาดเดาจากกฎของแบรกก์ จะเป็นสัดส่วนกับค่า $|F|^2$ นี้เอง

บทที่ 3

อิเมจเพลตและการปรับแต่งอิเมจเพลต

3.1 อิเมจเพลต

อิเมจเพลต (Image Plate) เป็นอุปกรณ์ที่ไวต่อแสง ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจذبรังสี มีลักษณะคล้ายแผ่นฟิล์มซึ่งมีสารเรืองแสง (Phosphors) เป็นองค์ประกอบ โดยสารเรืองแสงดังกล่าวจะทำหน้าที่พักและเก็บพลังงานจากรังสีหรือคลื่น พลังงานจากรังสีหรือคลื่นดังกล่าวจะอยู่ในสภาวะเสถียรจนกระทั่งนำไปสแกนด้วยแสงเลเซอร์ (laser beam) ซึ่งจะทำให้อิเมจเพลตปลดปล่อยพลังงานออกมาโดยการเปล่งแสง (luminescence) ที่มีความยาวคลื่นเป็นค่าเฉพาะ เทคนิคนี้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในกา รวินิจฉัยโรคทางการแพทย์โดยใช้รังสีเอกซ์ หลังจากนั้นจึงเริ่มนำมาใช้ในวงการวิทยาศาสตร์จนถึงปัจจุบัน

สารแบบพิเศษที่นำมาใช้ในการทำอิเมจเพลตนั้น จะต้องมีคุณสมบัติในการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงเมื่อได้รับพลังงานจากการแผ่รังสี เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV rays) หรือการยิงด้วยอิเล็กตรอน ในบางกรณีอาจเกิดได้จากการให้ความร้อนหรือปฏิกิริยาเคมี เรียกสารที่มีคุณสมบัติเหล่านี้ว่า สารวาวแสง (fluorescent substances) กรณีที่สารสมบัติดังกล่าวและมีลักษณะเป็นผง จะเรียกว่า สารเรืองแสง (Phosphors)

การปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงเมื่อถูกกระตุ้น แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาหยุดทันทีหลังหยุดทำสารกระตุ้นเรียกว่า การวาวแสง (Fluorescence)
2. พลังงานแสงที่ถูกปล่อยออกมายังคงปลดปล่อยพลังงานออกมาได้ขณะหนึ่งหลังหยุดทำการกระตุ้นเรียกว่า การเรืองแสง (Phosphorescence)

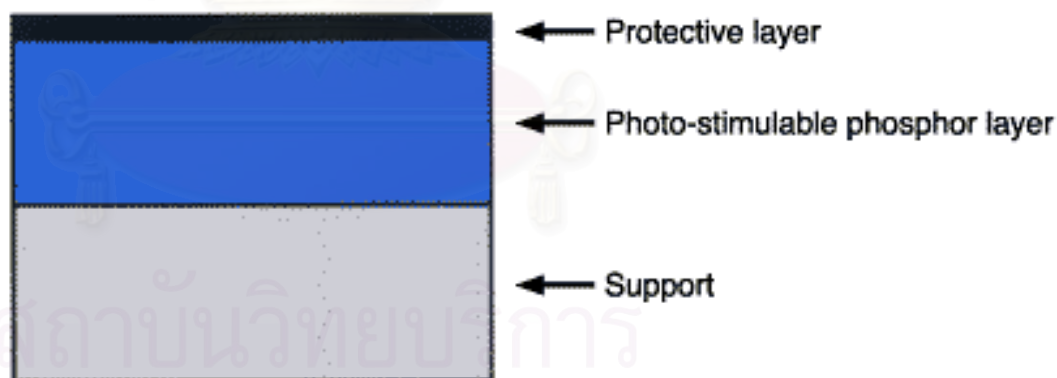
อย่างไรก็ตามสารบางชนิดอาจมีคุณสมบัติทั้ง 2 อย่าง กล่าวคือ สามารถปลดปล่อยพลังงานออกมาขณะถูกกระตุ้นด้วยแสง และสามารถปลดปล่อยพลังงานออกมาได้หลังหยุดการกระตุ้นด้วยแสง เรียกสารลักษณะนี้ว่า สารลูมิเนสเซนส์ (Luminescence) จากคุณสมบัติเด่นของสารจำพวกนี้ จึงได้นำมาปรับใช้ในกระบวนการ ผลิตตัวตรวจจذبรังสี โดยลักษณะการนำไปใช้ขึ้นอยู่กับประเภทและความต้องการของการนำไปใช้

สารเรืองแสงที่จะนำมาใช้ในอิมเมจเพลต มีคุณสมบัติพิเศษเพิ่มขึ้นจากคุณสมบัติที่กล่าวไปแล้ว อิมเมจเพลตจะมีคุณสมบัติที่เรียกกันว่า การเปล่งแสงโดยใช้แสงกระตุ้น (Photostimulate luminescence, PSL) ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวจะไม่ใช่ทั้ง การรวบรวมแสง และการเรืองแสง

การเปล่งแสงโดยใช้แสงกระตุ้นถูกค้นพบที่ประเทศฝรั่งเศสราวศตวรรษที่ 19 สมบัติของอิมเมจเพลตจะมีลักษณะพิเศษที่สามารถปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง เมื่อทำการกระตุ้นด้วยพลังงานในรูปของแสงครั้งที่สอง ซึ่งจะใช้แสงที่มีค่าความยาวคลื่นมากกว่าการกระตุ้นครั้งแรก

ในช่วงแรกของการค้นพบ การเปล่งแสงโดยใช้แสงกระตุ้น คุณสมบัติของมันแทบจะไม่ได้ได้รับความสนใจ จากนักวิทยาศาสตร์ จนกระทั่งประเทศญี่ปุ่นได้ทดลองนำคุณสมบัตินี้ไปใช้ในการทหาร และทำการศึกษารายละเอียดมาจนกระทั่งจบสงครามโลกครั้งที่ 2 หลังจากนั้นการศึกษาก็จริงจังก็ได้เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1947 ในประเทศสหรัฐอเมริกา

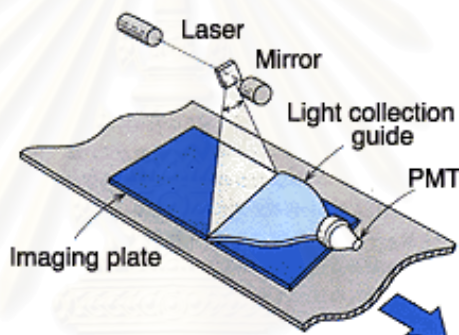
อิมเมจเพลต ประกอบด้วย ผงผลึกขนาดเล็กของธาตุเบเรียม ฟลูออโรโบรไมด์ (Barium fluorobromide) และอิตอนของธาตุยูโรเปียม (Eu) จำนวนเล็กน้อย โดยมีสูตรทางเคมี คือ $BaFBr:Eu^{2+}$ [8]นำมาเคลือบบนสารโพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเรซิน ดังรูปที่ 3.1



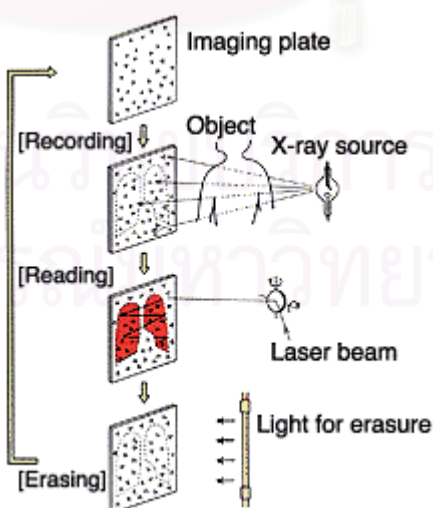
รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของอิมเมจเพลต[9]

ในการเก็บข้อมูลที่ได้จากอิมเมจเพลต ทำได้โดยการนำ อิมเมจเพลตที่ได้รับการกระตุ้นไปตรวจสอบโดยใช้ลำแสงเลเซอร์สีแดงที่มีพลังงานสูง แล้วจึงตรวจ จับพลังงานที่ส่งออกมาโดยใช้เครื่องตรวจจับสัญญาณแสง ดังรูปที่ 3.2

ความละเอียดในการเก็บข้อมูลที่ได้จากสัญญาณแสงจากอิมเมจเพลตนั้น สามารถเลือกได้ตั้งแต่ 5 – 40 pixel/mm ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานว่าต้องการความละเอียดมากหรือน้อย แสงสีเทอมำน้ำเงินที่มีความยาวคลื่นประมาณ 400 nm จะถูกปล่อยออกมาหลังจากถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ ในงานวิจัยฉบับนี้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์และประเมินผลจะถูกแปลงออกมาในรูปของความเข้มชั้นของพลังงานแสง (Intensity) ต่อตำแหน่งบนอิมเมจเพลต ในรูปของพิกเซล ซึ่งก็คือจุดของเลเซอร์บนอิมเมจเพลต



รูปที่ 3.2 แสดงอิมเมจเพลตขณะที่กำลังถูกกวาดด้วยลำแสงเลเซอร์และถูกเก็บข้อมูลเข้าสู่เครื่องตรวจจับและขยายสัญญาณแสง (photomultiplier tube) เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า[9]

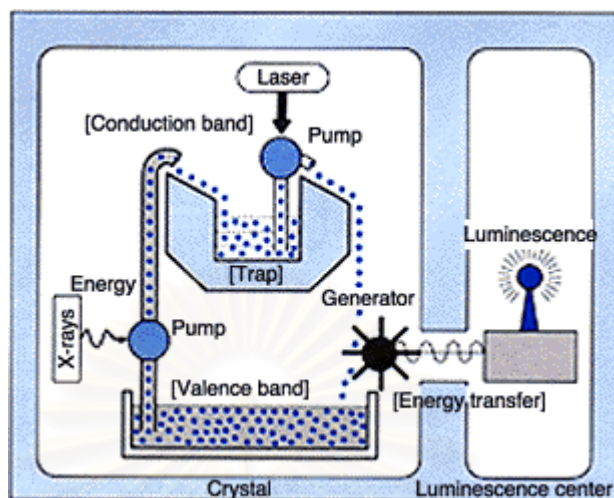


รูปที่ 3.3 แสดงกระบวนการในการใช้งานอิมเมจเพลตที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้งหลังจากลบด้วยแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ (visible light)[9]

ข้อดีประการหนึ่งของการใช้อิเมจเพลตในการทดลองเกี่ยวกับการเลี้ยวเบนของแสง คือสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ในขณะที่ฟิล์มถ่ายภาพไม่สามารถทำได้ กระบวนการในการใช้อิเมจเพลตได้แก่ การบันทึกภาพการเก็บข้อมูลและการลบภาพ ดังแสดงใน รูปที่ 3.3 สารที่นำมาใช้ในการผลิตอิเมจเพลต คือ $BaFX:Eu^{2+}$ (X คือ Cl, Br หรือ I) ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกไอออนิก (ionic crystals) ที่มีโครงสร้างแบบเทตระโกนอล (tetragonal structure) และเมื่อผลึกถูกอาบด้วยรังสีที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในย่านค่าความยาวคลื่นเดียวกันกับรังสีเอกซ์ จะเกิดภาวะที่เรียกว่าภาวะคัลเลอร์ เซนเตอร์ (color center) เมื่ออิเล็กตรอนถูกจับไว้ในแลตทิซ (lattice) ที่ว่างของ F หรือ X โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณความไม่ตรงกัน (discrepancy) ของการประกอบกันเป็นส่วนต่างๆ ของ F และ X

กลไกการทำให้เกิดการเรืองแสงของ $BaFX:Eu^{2+}$ มีดังนี้ เริ่มจากบางส่วนของอิตอน Eu^{2+} กลายเป็น Eu^{3+} หลังจากที่ได้รับการกระตุ้นจากรังสีเอกซ์ [10] อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นจากแถบเวเลนซ์ (valence band) ไปสู่แถบการนำ (conduction band) อิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกกักขังในโครงสร้างที่บกพร่องของธาตุโบรมีน ซึ่งมีอยู่ทั่วไป บนอิเมจเพลตและ จะทำให้เกิด ภาวะคัลเลอร์ เซนเตอร์ทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะกึ่งเสถียร หลังจากนั้นเมื่อกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์ อิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกกระตุ้นสู่แถบการนำอีกครั้งและปลดปล่อยพลังงานออกมา ในรูปของแสงเพื่อกลับเข้าสู่สภาวะเสถียร [11] ดังรูปที่ 3.4 โดยค่าพลังงานในรูปของแสงดังกล่าวนี้เองที่สามารถอ่านได้จากเครื่องอ่านอิเมจเพลต โดยค่าที่ได้จะถูกอ่านออกมาอยู่ในรูปของค่าความเข้ม ต่อ ตำแหน่งในรูปแบบของพิกเซล หลังจากการนำเอาอิเมจเพลตมาอ่านด้วยเครื่องอ่านอิเมจเพลต จะต้องนำอิเมจเพลตมาทำการลบด้วยเครื่องลบอิเมจเพลต (Image Eraser) เพื่อให้อิเล็กตรอนที่ตกค้างอยู่ภายในภาวะคัลเลอร์เซนเตอร์ภายในอิเมจเพลต ถูกกระตุ้นให้ตกลงมายังแถบเวเลนซ์ ซึ่งถ้าไม่ทำการลบอิเมจเพลต จะทำให้เกิดภาพซึ่งทำให้เกิดการรบกวนของข้อมูลในการทดลองครั้งต่อไป เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ตกค้างอยู่ดังกล่าวนี้เอง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้สร้างเครื่องลบอิเมจเพลต โดยใช้แสงขาว (white beam) ที่ได้จากหลอดไฟทั่วไปมาทำการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากภาวะคัลเลอร์เซนเตอร์ โดยรูปที่ 3.5 จะแสดงโครงสร้างของเครื่องลบอิเมจเพลตซึ่งได้สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงกระบวนการแปลงแสงของอิเมจเพลต[9]

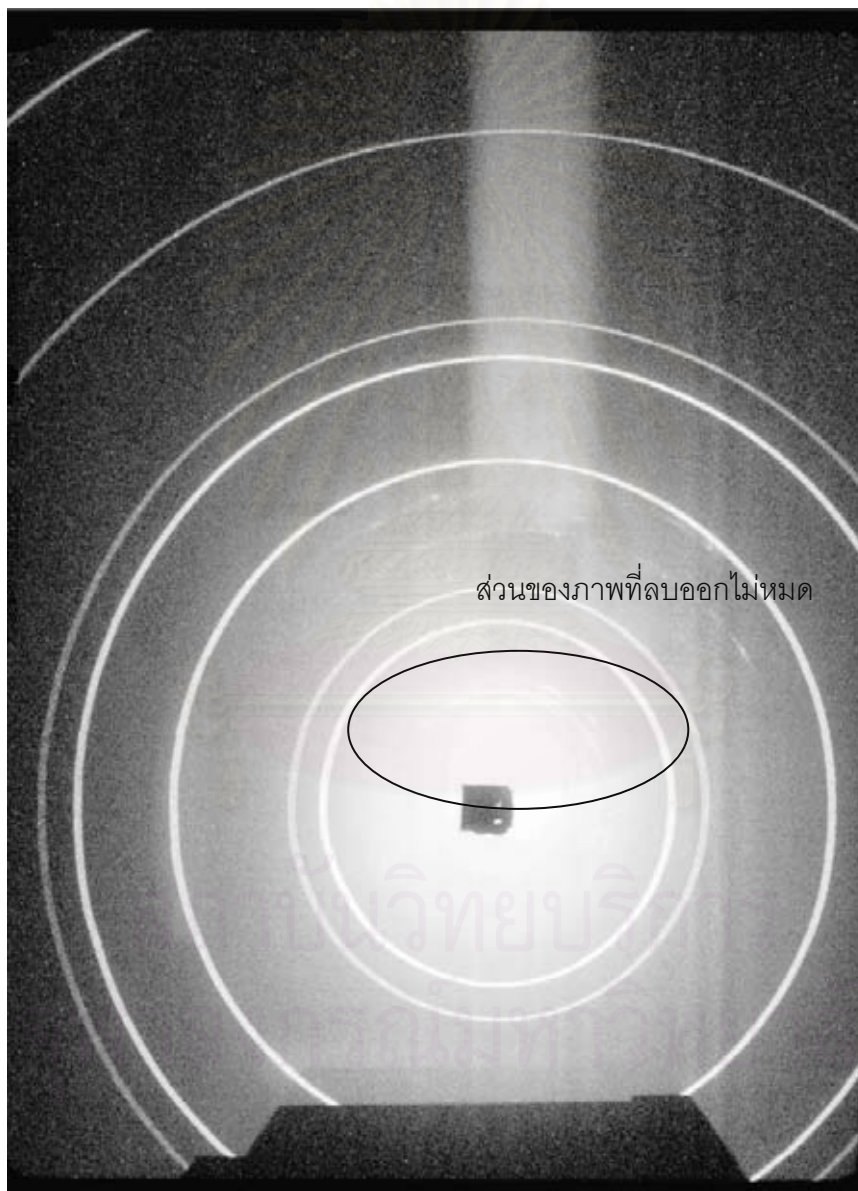


ก)

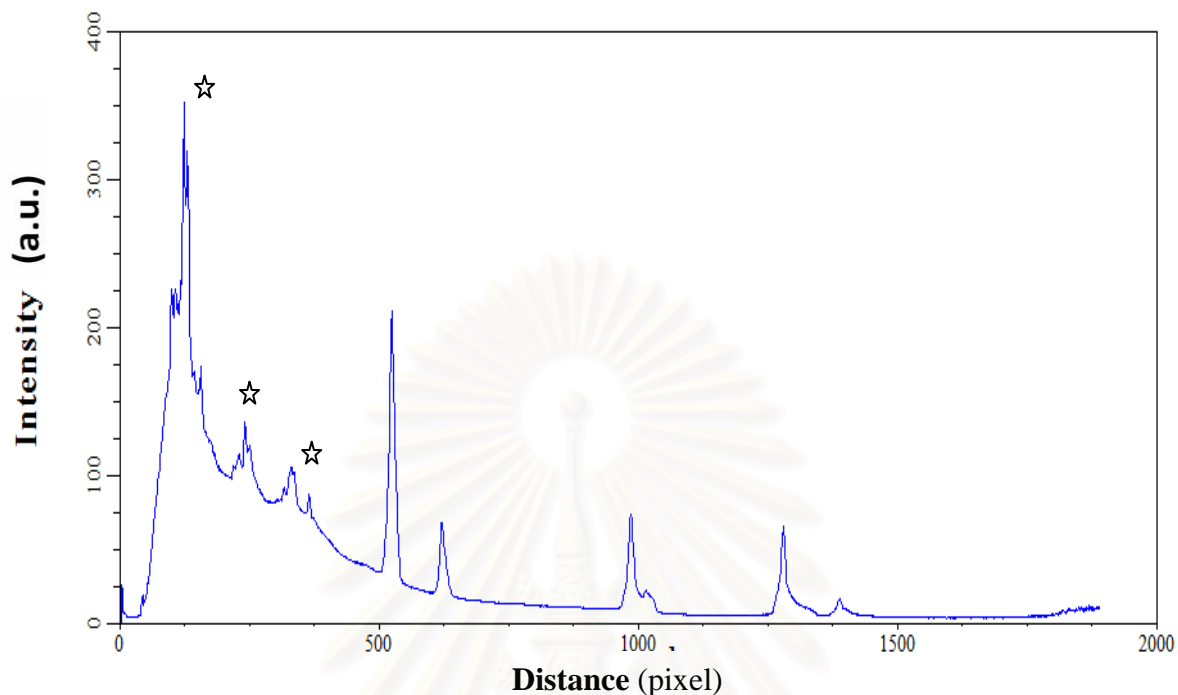
ข)

รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องลบภาพบนอิเมจเพลต ก) อิเมจเพลตขณะทำการลบภาพด้วยเครื่องลบภาพบนอิเมจเพลต ข) ลักษณะภายในเครื่องลบอิเมจเพลต

ดังที่ได้กล่าวถึงไปแล้วว่าในกรณีที่ทำการอ่านข้อมูลจากอิมเมจเพลต แล้วไม่ได้ทำการลบออกทั้งหมดจะทำให้เกิดเป็นภาพตกค้างอยู่บนอิมเมจเพลต เครื่องลบอิมเมจเพลตที่มีคุณภาพที่ดีจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ เพื่อป้องกันการผิดพลาดของข้อมูลจากการตกค้างของภาพซึ่งไม่ได้ทำการลบให้หมด ซึ่งตัวอย่างของภาพบนอิมเมจเพลต และผลจากการรวมข้อมูลจากอิมเมจเพลตที่ทำการลบได้อย่างไม่หมดได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 แสดงข้อมูลที่ตกค้างอยู่บนอิมเมจเพลตเนื่องจากการลบภาพไม่หมด



รูปที่ 3.7 แสดงผลของการรวมข้อมูลของอิเมจเฟลตที่ทำการลบภาพออกไม่หมด เครื่องหมาย ☆ หมายถึงยอดที่เกิดจากการลบภาพออกไม่หมด

จากรูปที่ 3.7 สังเกตว่ามียอดที่เกิดจากภาพที่ตกค้างอยู่บนอิเมจเฟลต ซึ่งถ้านำผลการรวมข้อมูลใน 1 มิติ ดังภาพนี้ไปใช้ในการหาโครงสร้างของสารตัวอย่าง จะทำให้เกิดการผิดพลาดขึ้นเนื่องจากในการหาโครงสร้างของสารจำเป็นที่จะต้องพิจารณา ค่ามุม 2θ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนจากสารตัวอย่างทุกอย่างอด และถ้ามียอดที่เกิดจากสารอื่นหรือเกิดจากสารเดียวกันแต่มีระยะระหว่างสารตัวอย่างไปยังอิเมจเฟลตต่างกัน จะทำให้การระบุค่ามุม 2θ มีความผิดพลาดและไม่สามารถหาโครงสร้างที่แท้จริงของสารนั้นๆได้ ขั้นตอนการลบภาพบนอิเมจเฟลตจึงมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่า ส่วนของการทำการทดลองเพื่อให้เกิดการเลี้ยวเบนจากสารตัวอย่างแล้วทำให้เกิดภาพบนอิเมจเฟลต ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้เวลาในการลบภาพบนอิเมจเฟลต 15 นาที ต่อครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถลบภาพบนอิเมจเฟลตได้ทั้งหมด

3.2 การปรับแต่งอีเมลเพลด

ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการอ่านภาพจากเครื่องอ่านอีเมลเพลด เป็นปัญหาสำคัญประการหนึ่งซึ่งทำให้ข้อมูลที่ได้จากการอ่านอีเมลเพลดมีลักษณะผิดเพี้ยนไป ส่งผลให้ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกมีความผิดเพี้ยนตามไปด้วย การปรับแต่งเครื่องอ่านอีเมลเพลดจึงมีความสำคัญมาก โดยทั่วไปแล้วปัญหาความผิดเพี้ยนจากการอ่านข้อมูลบนอีเมลเพลดเกิดขึ้นเนื่องจาก 2 องค์ประกอบสำคัญ

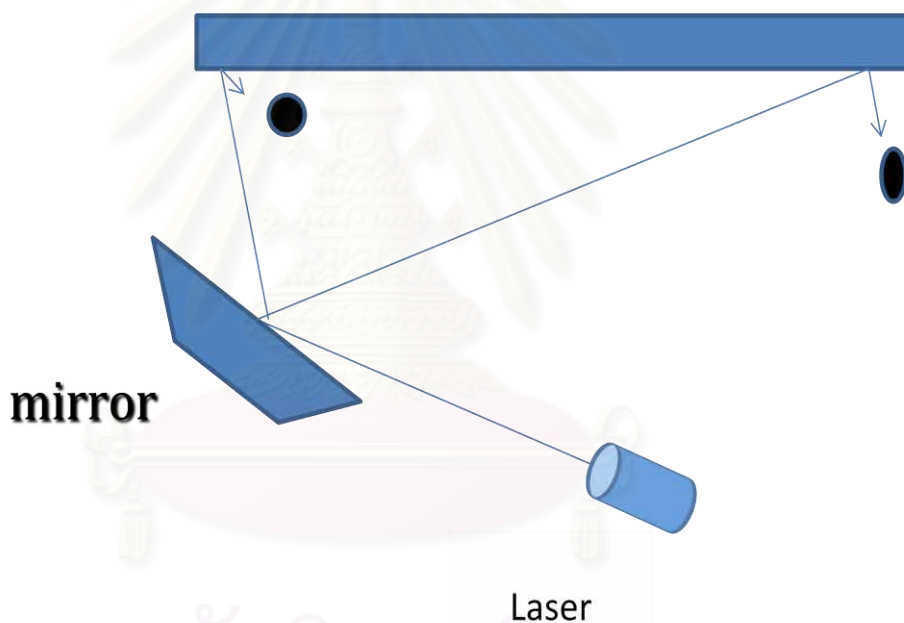
- 1) ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของเครื่องอ่านอีเมลเพลดมีลักษณะไม่เป็นเส้นตรง
- 2) ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการลำแสงเลเซอร์ที่ทำการยิงเพื่ออ่านอีเมลเพลดมีลักษณะผิดเพี้ยน [12]

ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ดังกล่าวสามารถแก้ปัญหาคำโดยฉายคลื่นรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะสม่ำเสมอลงบนอีเมลเพลด จากนั้นนำอีเมลเพลดไปอ่านข้อมูลด้วยเครื่องอ่านอีเมลเพลด เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่ฉายลงบนอีเมลเพลดมีลักษณะสม่ำเสมอ ดังนั้นทำให้เราทราบได้ว่าตำแหน่งใดบนอีเมลเพลดที่มีลักษณะการอ่านค่าความเข้มเพี้ยนไปจากปกติซึ่งขั้นตอนนี้ทำโดยช่างเทคนิค ในขั้นตอนการติดตั้งเท่านั้น เนื่องจากความเพี้ยนนี้เกิดจากสมบัติของเส้นใยนำแสงภายใน ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักตลอดอายุการใช้งานของเครื่องมือ

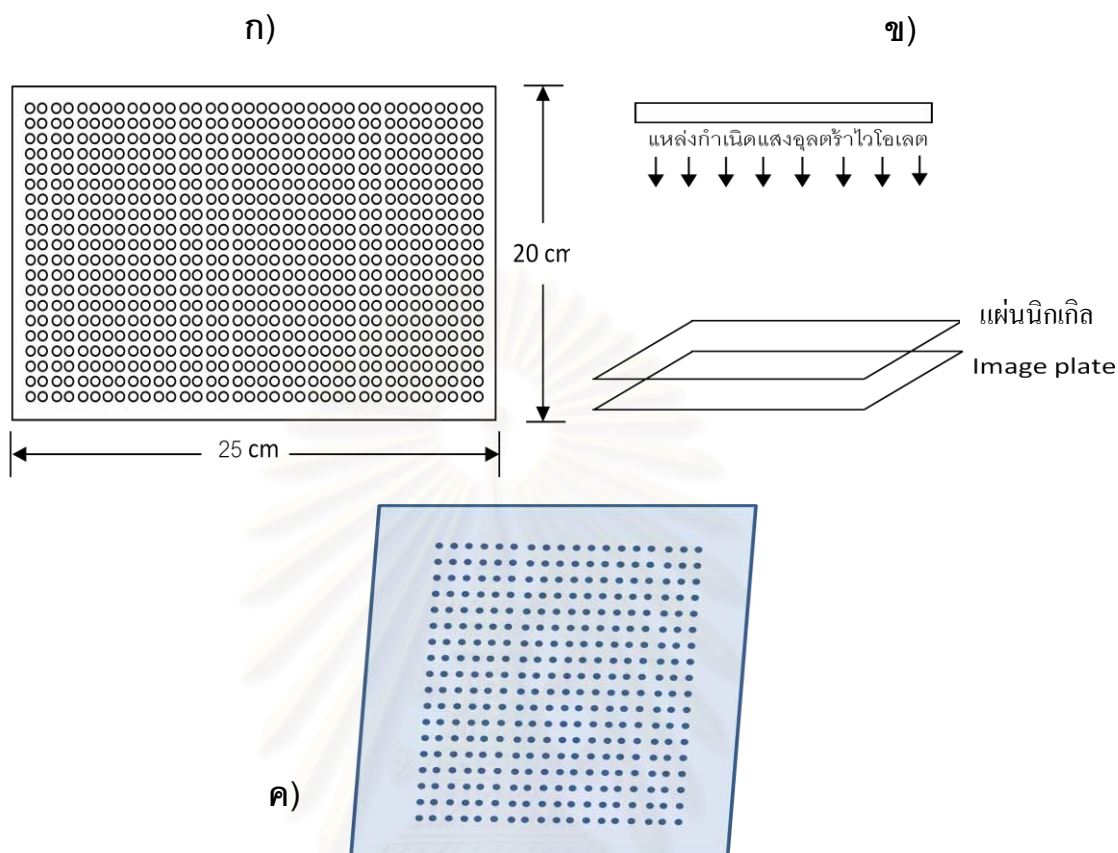
ในงานวิจัยครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องอ่านอีเมลเพลดแบบที่ส่องกล่าวคือ ในตัวเครื่องอ่านอีเมลเพลดตรงส่วนที่ยิงเลเซอร์เพื่อทำการกระตุ้นอิเล็กตรอนในสถานะคัลเลอร์เซนเตอร์ เพื่อให้อิเล็กตรอนกลับสู่ภาวะปกติ และวัดปริมาณคลื่นรังสีเอกซ์ที่แผ่ออกมานั้นจะอยู่หนึ่ง ลำเลเซอร์จะเคลื่อนไปบนอีเมลเพลดโดยใช้กระจกที่มีมอเตอร์เป็นตัวควบคุมแล้วทำการสะท้อนแสงเลเซอร์ลงบนอีเมลเพลดดังรูปที่ 3.8 เนื่องจากอีเมลเพลดมีลักษณะแบนและแหล่งกำเนิดเลเซอร์อยู่หนึ่ง เมื่อเลเซอร์ทำการกวาดภาพลงบนอีเมลเพลดนั้น แต่ละตำแหน่งจะมีลักษณะของจุดไม่เหมือนกัน สาเหตุอีกประการหนึ่งเกิดขึ้นเนื่องจาก อัตราเร็วเชิงมุมของกระจกที่ทำการสะท้อนแสงเลเซอร์ลงบนอีเมลเพลดมีค่าคงที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วในการสแกนของเลเซอร์มีค่าแปรปรวน สาเหตุทั้งสองประการนี้ส่งผลให้ขนาดและการแบ่งแยกของแต่ละพิกเซลมีค่าไม่แน่นอน

เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งไม่ได้ถูกเก็บค่าไว้ในไฟล์ภาพที่ได้จากเครื่องอ่าน โดยเครื่องอ่านจะบันทึกเฉพาะค่าความเข้มแสงของแต่ละพิกเซลเท่านั้น ไม่ได้ระบุตำแหน่งของแต่ละจุดบนอีเมลเพลดในรูปของพิกเซลจริงๆ นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างพิกเซลก็ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึง

มีความจำเป็นที่จะต้องทำให้ตำแหน่งของพิกเซลมีค่ามาตรฐาน เพื่อที่การอ่านข้อมูลจากอิมเมจเพดตจะได้ไม่ผิดเพี้ยน โดยวิธีการดังกล่าวสามารถทำได้โดยวิธีการที่เรียกว่า การเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด (Grid calibration)[12] ซึ่งทำได้โดยการวางแผ่นตะแกรงนิกเกิลบางลงบนแผ่นอิมเมจเพดต แล้วฉายรังสีอุลตราไวโอเลตให้มีลักษณะขนานไปกับแนวรูของแผ่นนิกเกิล หรือตั้งฉากกับอิมเมจเพดตดังแสดงในรูปที่ 3.9 ก), ข) โดยพยายามให้รังสีตกกระทบอิมเมจเพดตอย่างสม่ำเสมอ และทั่วถึง ขนาดของรูบนแผ่นนิกเกิลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $200\ \mu\text{m}$ และอยู่ห่างกัน $1.997\ \text{mm}$ ถ้าพลังงานของรังสีไม่สูงจนเกินไป รังสีบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยนิกเกิล และส่วนที่เหลือจะผ่านรูบนตะแกรงทำให้เกิดภาพของจุดที่เป็นระเบียบบนอิมเมจเพดตดังแสดงในรูปที่ 3.9 ค)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 3.8 แสดงจุดของเลเซอร์ในแต่ละตำแหน่งบนอิมเมจเพดต

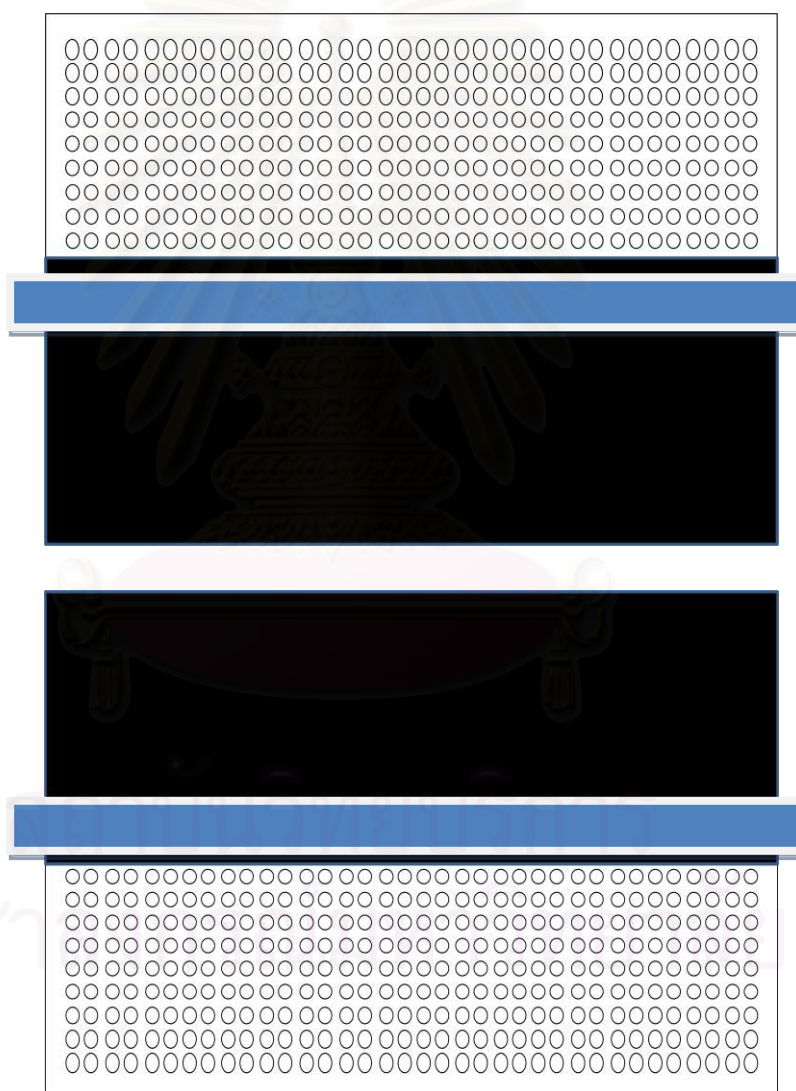


รูปที่ 3.9 ก) แสดงภาพจำลองของแผ่นนิกเกิล ข) แสดงภาพการฉายรังสีผ่านแผ่นนิกเกิลเพื่อทำให้เกิดภาพจุดสม่ำเสมอ ค) แสดงภาพจุดบนนิเมจเพลตที่เกิดจากการฉายรังสีผ่านแผ่นนิกเกิล

ในการทำการทดลองเพื่อปรับแก้เครื่องอ่านนิเมจเพลตนั้น ขั้นตอนของการฉายรังสี อุลตราไวโอเลตลงบนแผ่นนิกเกิล เพื่อใช้คาบของจุดที่มีลักษณะสม่ำเสมอบนนิเมจเพลตสำหรับใช้ในการปรับแต่งเครื่องอ่านนิเมจเพลต พบว่ามีปัญหาที่เกิดจากการวางแผ่นนิกเกิลลงบนนิเมจเพลต ตัวแผ่นนิกเกิลไม่ราบไปกับนิเมจเพลตโดยสมบูรณ์ ทำให้รูปร่างของจุดที่เกิดขึ้นบนนิเมจเพลตมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ และทำให้เกิดปัญหาในการปรับแก้เครื่องอ่านนิเมจเพลต สาเหตุที่ทำให้แผ่นนิกเกิลไม่ราบเรียบไปกับนิเมจเพลตดังกล่าว เกิดจากความบางของแผ่นนิกเกิลซึ่งทำให้เกิดการงอของตัวแผ่นนิกเกิลเอง วิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้กระดาษสีดำวางทาบลงไปบนแผ่นนิกเกิล แล้วฉายรังสีลงไปทีละส่วนโดยให้ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีและเวลา

ที่ฉายรังสีคงที่ ตรงบริเวณที่มีกระดาษสีดำทึบอยู่สามารถนำวัตถุอื่นที่มีลักษณะ เรียบวางทับลงบนแผ่นนิกเกิลเพื่อทำให้แผ่นนิกเกิลราบไปกับอิมเมจเพลตได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.10

หลังจากนั้นเมื่อทำการอ่านโดยเครื่องสแกนอิมเมจเพลต จะพบว่าจุดบนอิมเมจเพลตซึ่งเกิดจากรูของแผ่นนิกเกิลจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ เครื่องจะทำการวัดตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแต่ละจุดโดยการเฉลี่ยในทำนองเดียวกันกับการหาตำแหน่งศูนย์กลางมวล ในรูปของพิกเซล โดยระยะห่างจริงๆของรูบนแผ่นนิกเกิลได้ทราบอยู่แล้ว จึงสามารถเขียนสมการเพื่อทำการหาตำแหน่งจริงที่เหมาะสมในรูปของพิกเซลได้

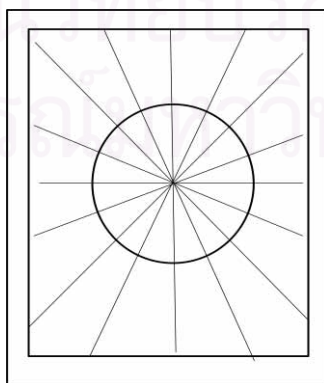


รูปที่ 3.10 วิธีการแบ่งครึ่งเพื่อทำการปรับแต่งอิมเมจเพลตโดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด

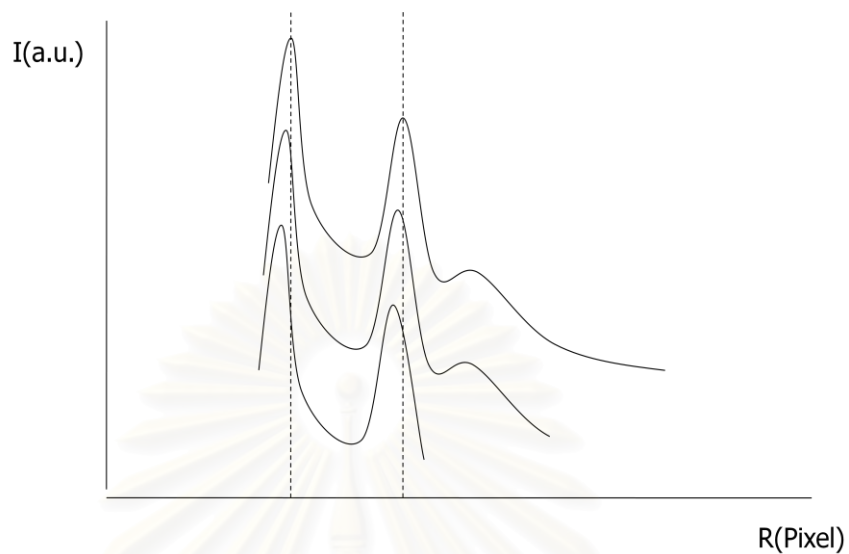
3.3 การรวมข้อมูลแบบสองมิติ

ในส่วนนี้จะอธิบายขั้นตอนการรวมข้อมูลที่ได้จากอิเมจเพลตของซอฟต์แวร์ที่มีชื่อว่า “Edipus”[12] ซึ่งเขียนขึ้นมาเพื่อ รวมข้อมูลจาก อิเมจเพลตโดยเฉพาะ การทำงานของโปรแกรมดังกล่าว คือ การแปลงข้อมูลที่ได้จากอิเมจเพลต ซึ่งมีลักษณะเป็นสองมิติให้กลายเป็นรูปแบบในหนึ่งมิติ

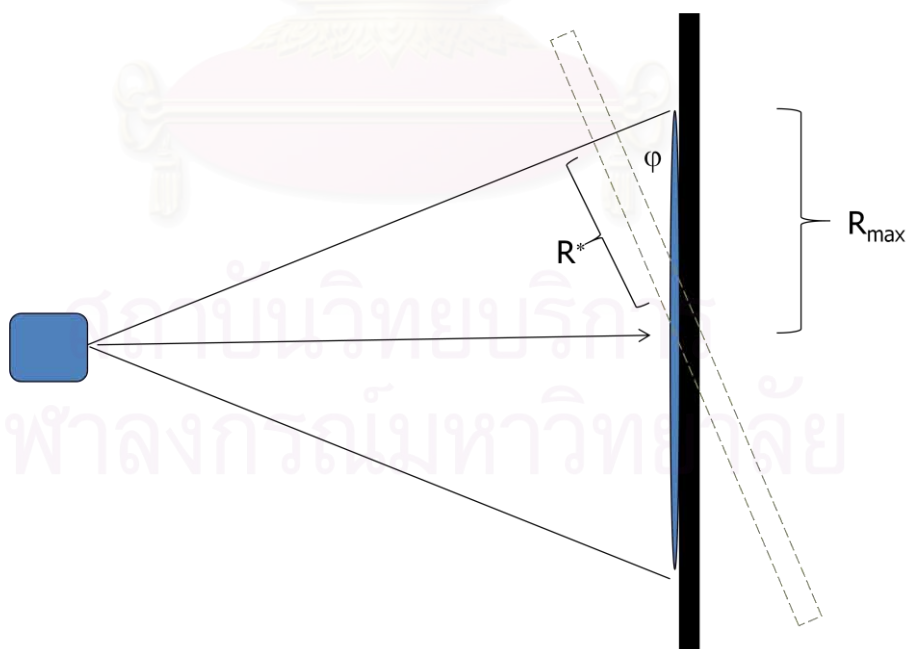
ขั้นตอนแรกในการทำงานของโปรแกรมจะพิจารณามุมเอียงของอิเมจเพลต โดยทั่วไปแล้วอิเมจเพลตจะไม่ได้จัดวางในลักษณะที่ตั้งฉากกับลำรังสีเอ็กซ์ที่เข้ามาตกกระทบจริงๆ ทำให้วงแหวน Debye Scherrer จะมีลักษณะเป็นวงรีบนอิเมจเพลตแทนที่จะเป็นวงกลม ถ้าไม่ทำการพิจารณาค่าความเอียงของอิเมจเพลต รูปแบบของการเลี้ยวเบนในการรวมข้อมูลจะมีลักษณะกว้างหรืออาจแยกออกจากกัน วิธีการปรับแต่งมุมเอียงของอิเมจเพลตมีดังนี้ ขั้นแรกโปรแกรมจะทำการแบ่งอิเมจเพลตออกเป็นส่วนย่อย 60 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.11 รอบจุดศูนย์กลาง โดยส่วนใหญ่จุดศูนย์กลางก็คือตำแหน่งจุดลำแสง (beam spot) ของลำรังสีเอ็กซ์ที่เข้ามาตกกระทบนั่นเอง เมื่อแบ่งส่วนย่อยดังกล่าวจะได้ข้อมูลในลักษณะ 60 แบบในหนึ่งมิติ ถ้าอิเมจเพลตไม่ได้ตั้งฉากกับลำรังสีเอ็กซ์ แถบการเลี้ยวเบนของข้อมูลทั้ง 60 แบบดังกล่าวจะมีลักษณะไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 3.12 การเฉลี่ยตำแหน่งของแถบการเลี้ยวเบนจากทั้ง 60 แบบทำได้โดยการพิจารณาว่าอิเมจเพลตเอียงไปในลักษณะอย่างไร โดยพิจารณาคู่ของข้อมูลที่มีค่าระยะห่างจากจุดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบตรงกันเป็นหลักดังแสดงในรูปที่ 3.13 แล้วคำนวณหาค่ามุมเอียงของแต่ละส่วนย่อย เพื่อทำการปรับแก้ค่าตำแหน่งที่ถูกต้องจะสามารถแก้ปัญหามุมเอียงดังกล่าวได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความเอียงดังกล่าวเสร็จสิ้น จะทำให้สามารถรวมข้อมูลจาก 2 มิติให้เหลือเพียง 1 มิติในรูปของ ค่าความเข้มกับตำแหน่งในรูปของพิกเซลได้ [12]



รูปที่ 3.11 แสดงการแบ่งอิเมจเพลตออกเป็นส่วนย่อยเพื่อรวมข้อมูลให้เหลือเพียง 1 มิติ



รูปที่ 3.12 แสดงผลการรวมข้อมูลจากแต่ละส่วนย่อยบนนิเมจเพลตในลักษณะ 1 มิติ ระหว่างค่าความเข้มกับระยะทาง



รูปที่ 3.13 ภาพแสดงนิเมจเพลตซึ่งไม่ได้ตั้งฉากกับรังสีเอกซ์ที่มาตกกระทบ

จากรูปที่ 3.13 สามารถพิจารณาหาค่าความเอียงของอิมเมจเพลตได้จากสมการ

$$R_{\max} \cos \varphi = R^* \quad 3.1$$

R_{\max} คือ คู่ของค่าของข้อมูลที่มีค่ามากที่สุด

R^* คือ ค่าของข้อมูลที่ตำแหน่งนั้น

φ คือ มุมเอียงของอิมเมจเพลต

จากการพิจารณาสมการที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าเป็นการคำนวณค่ามุมเอียงของอิมเมจเพลตของแต่ละส่วนย่อยได้ ซึ่งเมื่อสามารถคำนวณค่ามุมเอียงได้ก็จะสามารถทำการปรับแก้ข้อมูลของแต่ละส่วนย่อยทำให้ได้ข้อมูลของตำแหน่งที่ถูกต้อง ส่วนในกรณีของค่าความเข้มใช้วิธีการเฉลี่ยโดยปกติ

3.4 การเทียบมาตรฐานข้อมูล (Data Calibration)

ข้อมูลในรูปแบบหนึ่งมิติที่ได้จากโปรแกรม Edipus จะเป็นข้อมูลของค่าความเข้มเปรียบเทียบกับระยะรัศมี (ในรูปของฟิสิกเซล) จากตำแหน่งศูนย์กลางของจุด ที่รังสีเอกซ์ที่ไม่ได้กระเจิงเนื่องจากสารตัวอย่างตกกระทบ ก่อนที่จะนำข้อมูลที่วิเคราะห์ได้ดังกล่าว ไปวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึก จำเป็นจะต้องแปลงข้อมูลดังกล่าว ให้อยู่ในรูปแบบของค่าความเข้มเปรียบเทียบกับมุม 2θ โดยใช้ข้อมูลจากสารตัวอย่างแบบผงที่เป็นมาตรฐาน ที่ทราบค่าคงที่ของผลึกและค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่มาตกกระทบ ซึ่งสามารถคำนวณหาค่ามุม 2θ จากข้อของการเลี้ยวเบนใน 1 มิติได้ ทำให้สามารถแปลงค่าความเข้มเปรียบเทียบกับ ระยะทางในรูปของฟิสิกเซล ให้กลายเป็นค่าความเข้มเปรียบเทียบกับมุม 2θ

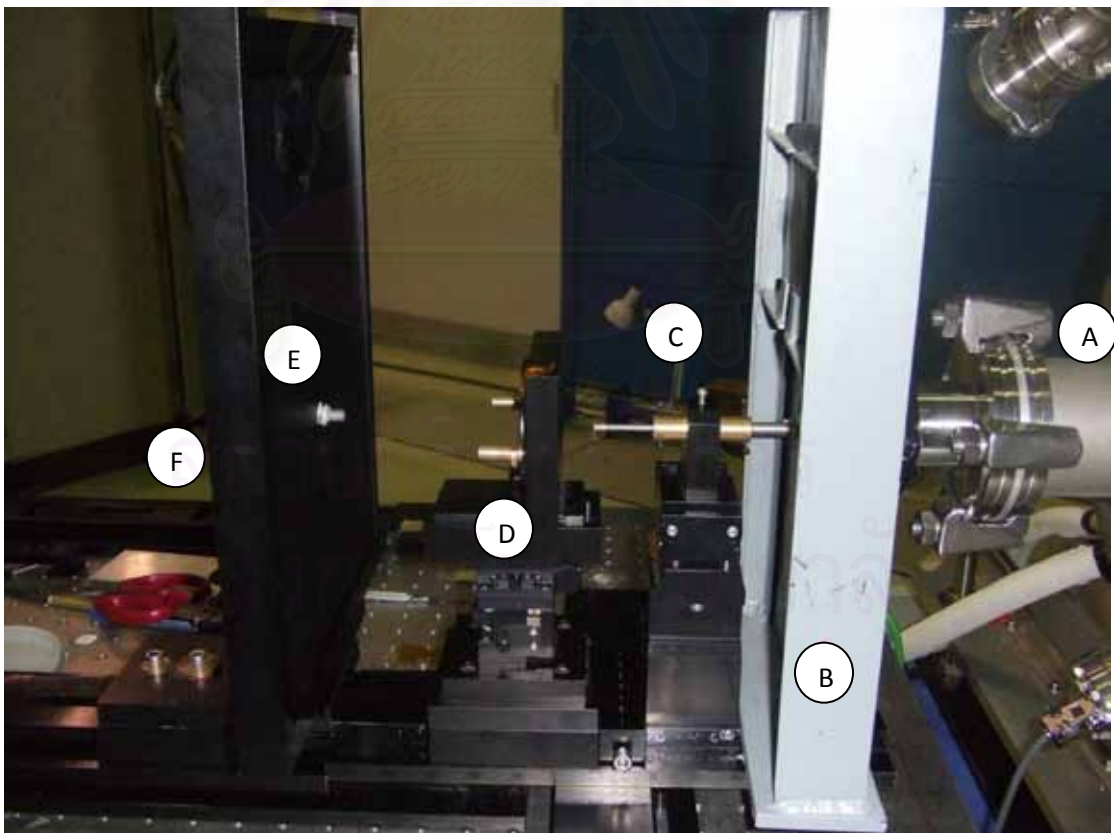
โดยใช้การปรับเทียบจากฟังก์ชันพหุนาม จากความรู้ทางเรขาคณิตสามารถหาได้ว่า ฟังก์ชันที่จะนำมาใช้ควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงในกราฟ $p = D \tan \theta$ เมื่อ p คือระยะทางในหน่วยฟิสิกเซล และ D คือ ระยะทางจากสารตัวอย่างไปยังอิมเมจเพลต แต่ในความเป็นจริงแล้วผลจากค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ และค่าความเอียงของอิมเมจเพลตจะทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากสมการดังกล่าว [12]

บทที่ 4

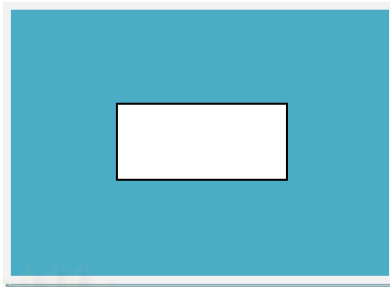
วิธีการทดลอง

4.1 วิธีการทดลองหาโครงสร้างของผลึก ZnO

งานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการเปรียบเทียบ เครื่องอ่าน อิเมจเพลตให้มีค่าเป็นมาตรฐาน โดยจะทำการวิเคราะห์หาผลการเปรียบเทียบดังกล่าวโดยการศึกษาโครงสร้างของผลึกผงของสารตัวอย่าง ZnO ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้สารมาตรฐาน Al_2O_3 ซึ่งสามารถทราบโครงสร้างได้อยู่แล้วจากฐานข้อมูลที่มีผู้ทดลองมาแล้วมาทำการเปรียบเทียบค่าความเข้ม (Intensity) กับ ระยะทาง (pixel) ให้เปลี่ยนแปลงเป็น ค่าความเข้มกับ มุม 2θ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของ ZnO ในการหาโครงสร้างของผลึกดังกล่าว จะใช้วิธีการศึกษา โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และใช้อิเมจเพลต (Image Plate) เป็นตัวตรวจจับแบบสองมิติดังรูป 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองเพื่อหาโครงสร้างของผลึกผง ZnO โดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบสองผ่าน ณ สถานีวิจัยที่ 2 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ



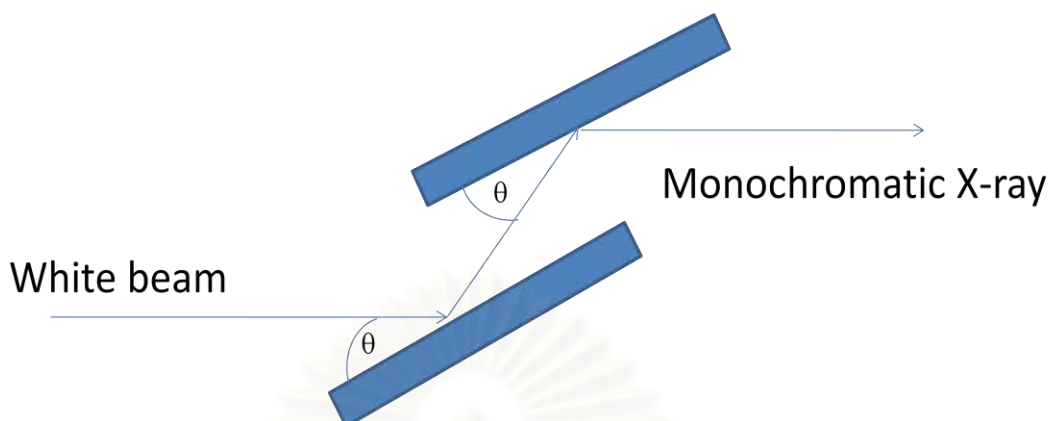
รูปที่ 4.2 แสดงภาพจำลองแผ่นอะลูมิเนียมสำหรับใส่สารตัวอย่างสำหรับการทดลอง

ในงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยมีส่วนร่วมในการพัฒนาเครื่องมือและเทคนิคในการทดลองโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่สถานีวิจัยที่ 2 เพื่อพัฒนารูปแบบการทดลองสำหรับการศึกษาโครงสร้างของผลึกผงภายใต้ความดันสูง

การเตรียมสารตัวอย่างผลึกผงของธาตุ ZnO จะเตรียมลงบนแผ่นอะลูมิเนียมที่มีช่องว่างอยู่ตรงกลาง โดยแผ่นอะลูมิเนียมมีขนาดความกว้างและยาว 1.8 และ 2.0 เซนติเมตรตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.2

ข้อมูลของสารตัวอย่าง ZnO ได้ทำการทดลอง จากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนแห่งชาติ สถานีวิจัยที่ 2 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยรังสีเอกซ์ที่นำมาใช้มีค่าพลังงาน 9 keV หรือมีความยาวคลื่น 1.377 Å อุปกรณ์ต่างๆที่สถานีที่ 2 แสดงดังรูป 4.1 โดยอุปกรณ์ต่างๆทำหน้าที่ยังนี้

A ตัวทำแสงเอกรงค์ (Monochromator) จะทำหน้าที่เป็นตัวปรับเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความยาวคลื่นสำหรับใช้ในการทดลอง เนื่องจากแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดมีความยาวคลื่นหลายค่าหรือเรียกว่าเป็นแสงขาว (white beam) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพื่อทำหน้าที่เลือกค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมมาใช้ในการทดลอง หลักการทำงานของตัวทำแสงเอกรงค์ คือการนำผลึก Si ที่มีองค์ประกอบในระนาบ (111) 2 ชั้นมาวางต่อกัน และทำการปรับค่ามุม เพื่อให้รังสีเอกซ์ที่มาตกกระทบสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เพื่อเลือกค่าความยาวคลื่นที่ออกมาจากตัวทำแสงเอกรงค์ให้มีค่าเพียงค่าเดียว ตัวทำแสงเอกรงค์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็น ตัวทำแสงเอกรงค์ชนิดผลึกคู่ (double-crystals monochromater) ตัวทำแสงเอกรงค์ชนิดนี้จะทำให้รังสีเอกซ์ที่ได้จากตัวทำแสงเอกรงค์มีการแยกชัดที่สูง (high resolution) และสามารถควบคุมลำรังสีให้อยู่ในทิศทางเดิมได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 [13] รังสีเอกซ์ที่ได้จากตัวทำแสงเอกรงค์จะมีความยาวคลื่นเพียงค่า

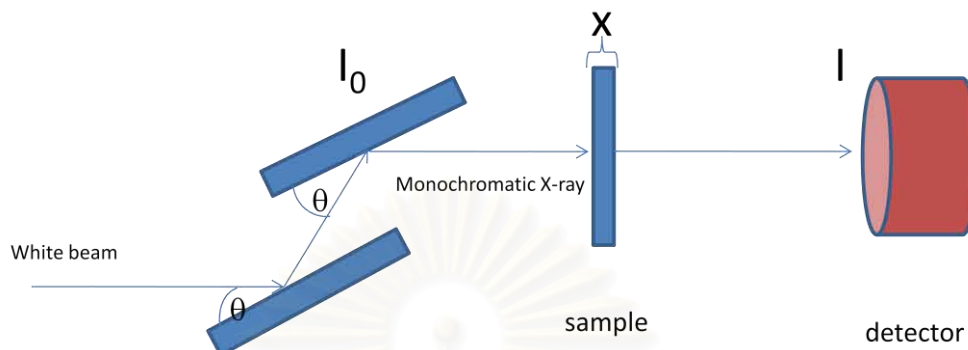


รูปที่ 4.3 แสดงตัวทำแสงเอกรงค์แบบผลึกคู่

เดี่ยวค่อนข้างจะแม่นยำเนื่องจาก มีการเลี้ยวเบนผ่านผลึกตามกฎของแบรกก์ถึง 2 ครั้ง ซึ่งรังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวนี้จะทำให้ผลการทดลองมีการแยกชัดที่สูงขึ้นด้วย

วิธีการตรวจสอบค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากตัวทำแสงเอกรงค์ ว่ามีค่าความยาวคลื่น ตรงกันกับในส่วนของ การแสดงผลถูกต้องหรือไม่ สามารถตรวจสอบได้โดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้พลังงาน (Energy calibration) โดยมีวิธีการที่กล่าวถึงการใช้สมบัติของการดูดกลืนของสารมาเกี่ยวข้องซึ่งได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 2 ซึ่งมีหลักการดังนี้

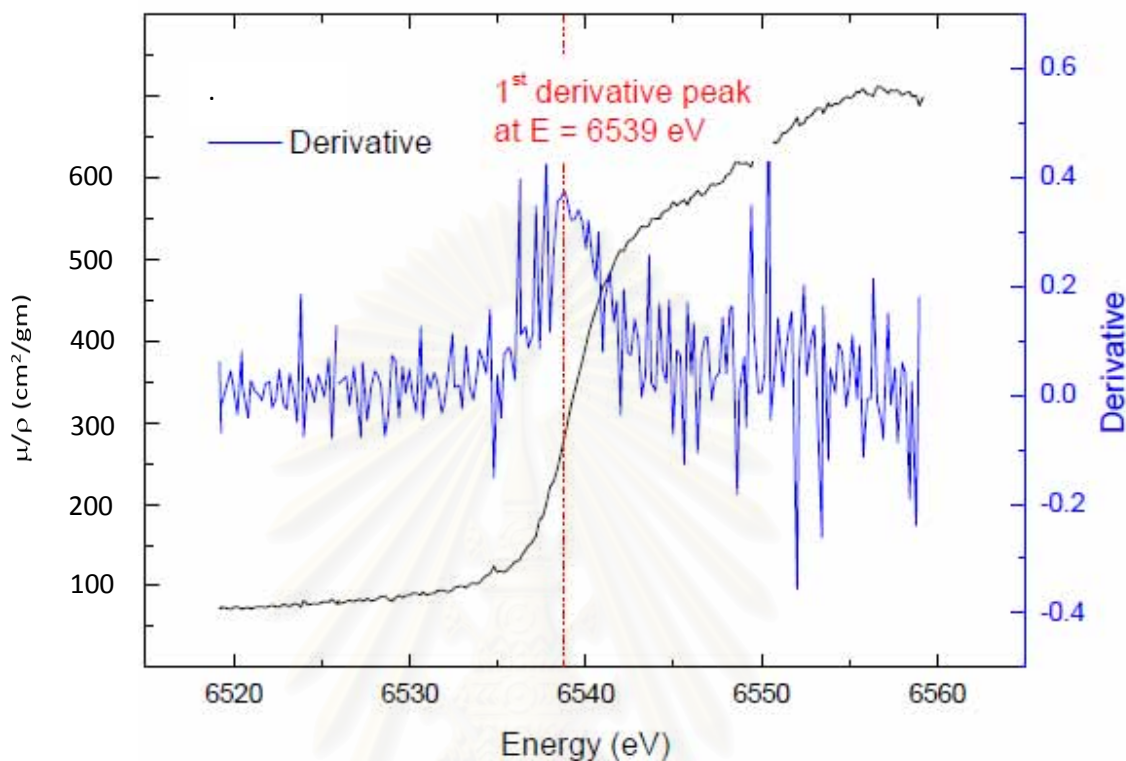
สมบัติในการดูดกลืนของสารที่จะนำมาใช้ในการเทียบมาตรฐานโดยใช้พลังงาน ก็คือค่าขอบของการดูดกลืน โดยวิธีการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และค่าขอบของการดูดกลืนของสารที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดกลืนได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ในการเทียบมาตรฐานโดยใช้พลังงานก็คือการปรับค่ามุมของตัวทำแสงเอกรงค์ เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากตัวทำแสงเอกรงค์ แล้วหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ค่าพลังงานนั้น ทำให้สามารถเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์เชิงมวลของสารที่นำมาใช้ในการทดลองกับค่าพลังงานของรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งจากการพิจารณาอนุพันธ์อันดับที่ 1 (1st derivative) จะทำให้สามารถทราบได้ว่าค่าพลังงานที่อ่านจากส่วนหน้าจอแสดงผล ตรงกันกับค่าพลังงานที่ขอบของการดูดกลืนหรือไม่ แล้วทำการปรับแก้ค่ามุมของตัวทำแสงเอกรงค์ให้ตรงกันกับค่าส่วนหน้าจอแสดงผลนี้เอง



รูปที่ 4.4 แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับทำการปรับตัวทำแสงเอกวงค์โดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้พลังงาน

Metal foil	Thickness (μm)	K-edge energy (eV)
Ti	6	4966
V	5	5465
Cr	2	5989
Mn	44	6539
Fe	7.5	7112

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาของสารตัวอย่างและค่าขอบของการดูดกลืนของสารนั้น



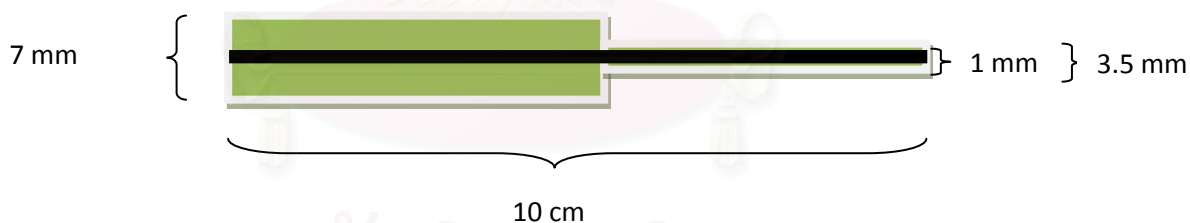
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของ Mn และอนุพันธ์อันดับที่ 1 สำหรับหาค่าขอบของการดูดกลืน

B แผ่นกั้นตะกั่ว (Pb screen) ถึงแม้ว่ารังสีเอกซ์ที่ได้จากตัวทำแสงเอกกรงค์จะมีค่าความยาวคลื่นเพียงค่าเดียว แต่ในบริเวณที่ลำรังสีเอกซ์ผ่านมาจากตัวทำแสงเอกกรงค์ยังมีรังสีเอกซ์ที่เป็นแสงขาวที่ไม่ได้ผ่านตัวทำแสงเอกกรงค์บางส่วนออกมาด้วย การวางแผ่นกั้นตะกั่วนี้จะช่วยกั้นรังสีเอกซ์ที่ผ่านมอดังกล่าวเพื่อไม่ให้เกิดแถบพื้นหลัง (background) บนฟิล์มเอกซเรย์ โดยแถบพื้นหลังจะเกิดขึ้นทั้งจากรังสีเอกซ์ที่ผ่านตัวทำแสงเอกกรงค์และไม่ผ่านตัวทำแสงเอกกรงค์

C ตัวทำขนาน (collimator) รังสีเอกซ์ที่มาจากตัวทำแสงเอกกรงค์นั้น มีลักษณะเป็นแถบรังสีซึ่งมีขนาดกว้าง 1 mm ยาว 0.9 cm จึงถือได้ว่าแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ในการทดลองนี้ไม่ได้มีขนาดเป็นจุด เมื่อแหล่งกำเนิดไม่ได้มีลักษณะเป็นจุด ขณะที่ รังสีเอกซ์ดังกล่าวนี้วิ่งผ่านสารตัวอย่างไปตกบนฟิล์มเอกซเรย์ จะทำให้เกิดการผิดพลาดมากขึ้นในการอ่านข้อมูลจากฟิล์มเอกซเรย์ เพราะมุมที่รังสีเอกซ์เลี้ยวเบนมาจากสารตัวอย่างนั้นอาจมีหลายค่า เนื่องจากแถบของรังสีเอกซ์ที่มาตกกระทบ เสมือนกับว่ามีจุดศูนย์กลางของวงแหวนของ Debye Scherrer หลายจุดทำให้ค่า

ความกว้างที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของค่ามากที่สุด (Full Width Half Maximum) (FWHM) ของยอด (peak) การเลี้ยวเบนมีค่าสูงมากนั่นเอง ตัวทำขนานจะทำหน้าที่คัดเอารังสีเอกซ์ที่ขนานกับตัวมันเองให้ผ่านไปได้ ถ้าตัวทำขนานมีขนาดยาวจะทำให้คัดแยกได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามขนาดของตัวทำขนานไม่ควรยาวเกินไปจนทำให้การวางอุปกรณ์อื่นๆเกิดปัญหา เนื่องจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์โดยอากาศได้ ในการทดลองครั้งนี้ ใช้ตัวทำขนานที่ทำจากทังสเตน คาร์ไบด์ มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกึ่งวงกลมความยาว 10 cm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 mm มีลักษณะดังภาพ 4.6

D ฐานวางสารตัวอย่าง (Sample stage) เป็นอุปกรณ์ที่ให้ใส่สารตัวอย่างสำหรับให้รังสีเอกซ์ส่องผ่านและไปตกกระทบลงบนนิเมจเฟลต โดยในการทดลองครั้งนี้ใช้ฐานวางสารตัวอย่างชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ภายใต้ความดันสูง คือมีช่องสำหรับใส่เซลล์ความดันสำหรับการปรับค่าความดัน หรือไดมอนด์ แอนวิล เซลล์ และฐานวางสารตัวอย่างสามารถปรับตำแหน่งได้ทั้งในแนวขนานไปกับลำแสงและแนวตั้งฉากทั้ง 2 แนวโดยฐานวางสารตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้มีลักษณะดังรูปที่ 4.7



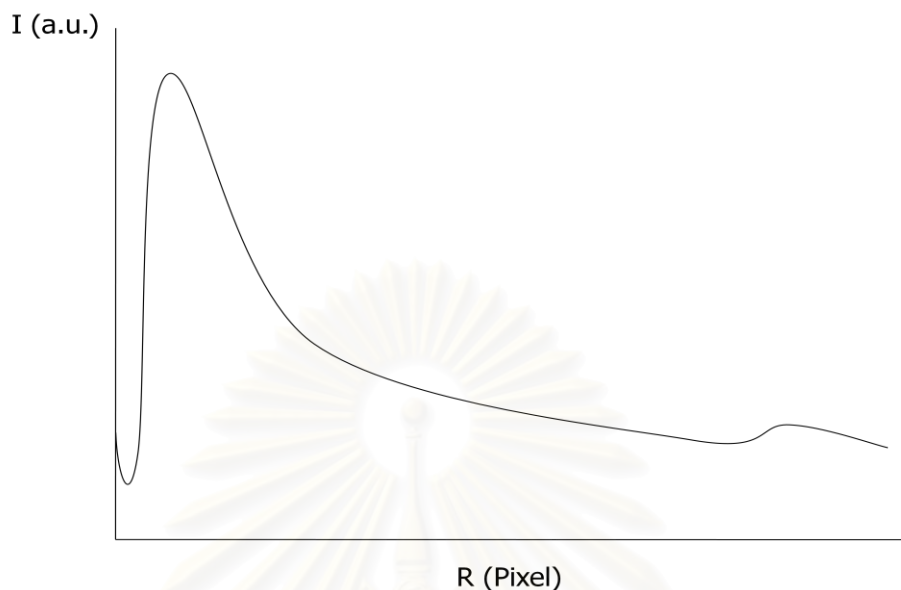
รูปที่ 4.6 แสดงภาพตัวทำขนานซึ่งนำมาใช้ในการทดลองด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.7 แสดงฐานวางสารตัวอย่างซึ่งใช้ในงานวิจัย โดยสามารถปรับระยะได้ทั้ง 3 แกน

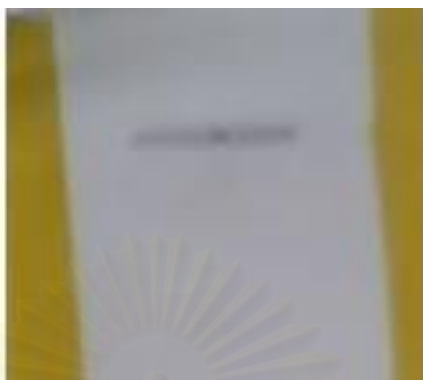
- ก) ส่วนประกอบของฐานวางสารตัวอย่างสำหรับปรับระยะในส่วนของความสูง
- ข) ส่วนประกอบของฐานวางสารตัวอย่างสำหรับปรับระยะในแนวตั้งฉากกับลำรังสีเอกซ์ทั้ง 2 แนว[14]

E ตัวหยุดลำแสง (Beam stop) เนื่องจากอิมเมจเพลตเป็นอุปกรณ์ที่ตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ได้ในช่วงความยาวคลื่นที่ค่อนข้างกว้าง ดังนั้นอิมเมจเพลตไม่เพียงแต่จะตรวจจับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงจากสารตัวอย่างเท่านั้น แต่ยังตรวจจับรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงจากส่วนอื่นๆรอบการทดลองด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันรังสีเอกซ์ดังกล่าวด้วยแผ่นกันตะกั่ว นอกจากนี้ยังมีตัวหยุดลำแสง ซึ่งเป็น อุปกรณ์ที่ช่วยในการลดแถบความเข้มของพื้นหลังที่เกิดจากรังสีเอกซ์ที่ผ่านสารตัวอย่างออกมาโดยไม่เกิดการเลี้ยวเบน และรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงของอากาศ เนื่องจากรังสีเอกซ์ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นรังสีเอกซ์ในย่านพลังงานต่ำ [12] โดยกราฟของค่าความเข้มพื้นหลังเทียบกับระยะทางจากจุดกึ่งกลางของลำแสงตกกระทบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความเข้มพื้นหลังบนอิเมจเพลตที่เกิดจากการกระเจิงของรังสีเอกซ์เนื่องจากอากาศ

F ตัวยึดจับอิเมจเพลต (Image Plate holder) เป็นอุปกรณ์สำหรับยึดจับอิเมจเพลตและเป็นตัวยึดตำแหน่งของอิเมจเพลตบนราง เพื่อให้ระยะห่างระหว่างอิเมจเพลตและสารตัวอย่างมีค่าคงที่ในการทดลอง เพราะค่าดังกล่าวมีความสำคัญในการคำนวณและการแปลงผันข้อมูลในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ความสำคัญอีกประการหนึ่งของตัวยึดจับอิเมจเพลตคือการช่วยลดปัญหาเกี่ยวกับความเอียงของอิเมจเพลต ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งตัวยึดจับอิเมจเพลตจะสามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ เนื่องจากอิเมจเพลตยังสามารถปรับความเอียงได้เล็กน้อยขณะที่ถูกยึดจับ ทำให้สามารถติดกระจกไว้ด้านหลังของตัวยึดจับอิเมจเพลตและสามารถปรับความเอียงของอิเมจเพลตได้ ซึ่งจะมีส่วนช่วยลดปัญหาในการรวมข้อมูลจาก 2 มิติ มาเป็น 1 มิติ



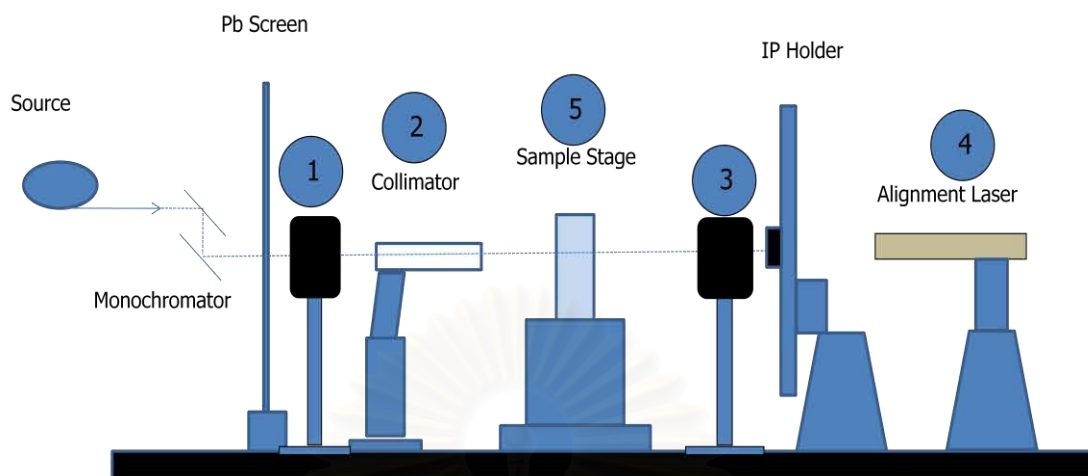
รูปที่ 4.9 แสดงรอยไหม้ที่เกิดจากรังสีเอกซ์ทำปฏิกิริยาบนกระดาษที่ใช้สำหรับการปรับแนว

วิธีการปรับแนว (alignment)

ในการปรับแนวอุปกรณ์สำหรับในการทำการทดลองมีความยุ่งยากในระดับหนึ่ง เนื่องจากเกิดปัญหาในการปรับแก้ความสูงของอุปกรณ์ โดยวิธีการปรับแนวของอุปกรณ์ในการทดลองมีดังนี้

วิธีการหลักที่ใช้ในการปรับแนวของอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ เรียกว่าวิธีการพิจารณา รอยไหม้ของกระดาษ (burn paper) โดยทำการยิงรังสีเอกซ์ที่ผ่านมาจากตัวทำแสงเอกกรังค์ลงบน กระดาษแบบ ไวแสง พิเศษ ที่จะทำปฏิกิริยา กับรังสีเอกซ์ทำให้เกิดแถบสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และแถบสีดำดังกล่าวจะเป็นตัวแทนของตำแหน่งของรังสีเอกซ์ที่ระยะต่างๆกัน ในปรับแนว อุปกรณ์การทดลองในงานวิจัยชิ้นนี้มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ฉายรังสีเอกซ์ลงไปยังกระดาษไวแสงที่อยู่ในตำแหน่ง ที่ 3 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.10
- 2) ฉายรังสีเอกซ์ลงไปยังกระดาษไวแสงที่อยู่ในตำแหน่ง ที่ 1

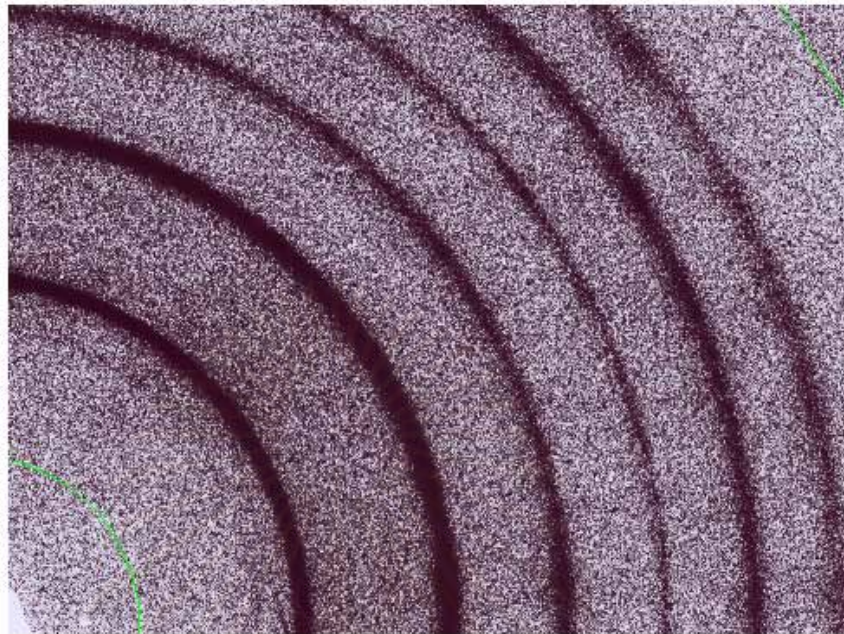


รูปที่ 4.10 แสดงภาพการจัดวางอุปกรณ์ เพื่อการปรับแนวก่อนทำการทดลองด้วยสารตัวอย่าง ZnO

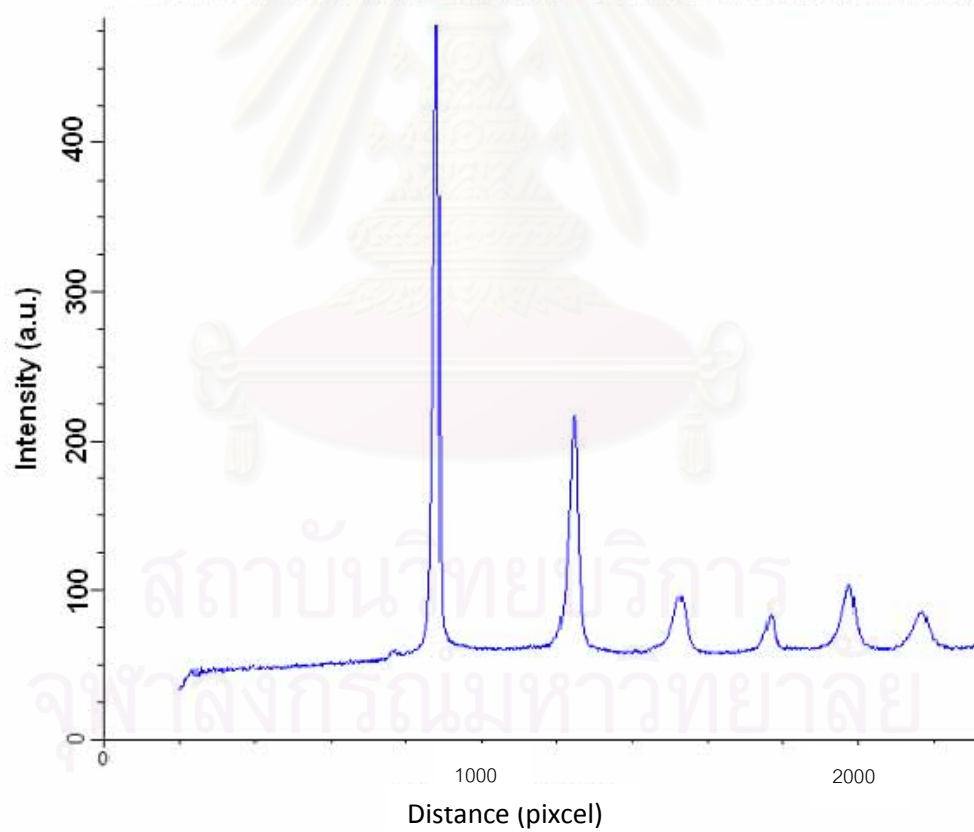
- 3) เจาะรูลงบนกระดาษไวแสงที่ใช้รับรังสีเอกซ์ที่ตำแหน่งที่ 3 และ 1 ตามลำดับ โดยเลือกเจาะรูบริเวณตรงกลางของแถบรังสีเอกซ์ที่ปรากฏบนกระดาษ ซึ่งรูบนกระดาษไวแสงจะเป็นตัวแทนของตำแหน่งของรังสีเอกซ์ที่ระยะที่ทำการเผากราะตาชั่ง จากนั้นทำการยิงแสงเลเซอร์ผ่านรูบนกระดาษที่ตำแหน่งที่ 3 และ 1 ตามลำดับโดยพยายามปรับแนวของเลเซอร์ให้ผ่านรูทั้ง 2 บนกระดาษได้ โดยเลเซอร์จะเป็นตัวแทนของลำรังสีเอกซ์หลังจากทำการยิงผ่านรูทั้ง 2
- 4) นำตัวทำขนานมาวางไว้ที่ ตำแหน่งที่ 2 ซึ่งอยู่ระหว่างตำแหน่งที่ 3 และ 1
- 5) ปรับแนวของตัวทำขนานจนกว่าเลเซอร์จะสามารถส่องผ่านไปยังรูบนกระดาษที่ตำแหน่งที่ 1 ได้ ซึ่งหมายความว่ารังสีเอกซ์จะผ่านตัวทำขนานในลักษณะเดียวกันเนื่องจากเลเซอร์เป็นตัวแทนของรังสีเอกซ์แล้ว
- 6) นำฐานวางสารตัวอย่างมาวางที่ตำแหน่ง 5 และพยายามยึดตำแหน่งและแนวของเลเซอร์ที่ใช้สำหรับการปรับแนวให้แน่นที่สุด
- 7) นำเอากระดาษที่ตำแหน่ง 3 ออกและนำอิมเมจเพลตพร้อมกับกรอบที่มีกระจกราบติดอยู่ด้านหลังวางแทน จากนั้นปรับความเอียงของอิมเมจเพลต โดยปรับให้แสงเลเซอร์ส่องที่มาตกกระทบกับอิมเมจเพลต สะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิดเลเซอร์
- 8) ติดตัวหยุดลำแสงลงไปยังกรอบของอิมเมจเพลตด้านหน้า

หลังจากทำการปรับแนวของอุปกรณ์ขั้นต่อไปคือการนำสารตัวอย่าง ZnO ที่เตรียมลงบนช่องว่างตรงกลางของแผ่นอะลูมิเนียมไปติดตั้งที่ฐานวางสารตัวอย่าง จากนั้นทำการทดลอง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อหาโครงสร้างของผลึกผงของสารตัวอย่าง โดยในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการทดลองที่ความดันบรรยากาศ และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ใช้รังสีเอกซ์ที่มีค่าพลังงาน 9 keV โดยทำการทดลองเป็นเวลา 4 ชั่วโมงต่อการทดลองหนึ่งครั้ง

หลังจากทำการทดลองแล้วจะนำอิเมจเพลทไปอ่านด้วยเครื่องอ่านอิเมจเพลท โดยเครื่องอ่านอิเมจเพลทที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท Molecular Dynamics ชื่อเครื่อง PhosphorImager หลังจากนำอิเมจเพลทมาอ่านด้วยเครื่องอ่านอิเมจเพลทแล้ว จำเป็นต้องทำการลบอิเมจเพลท เพื่อไม่ให้ภาพที่ตกค้างอยู่ในอิเมจเพลทไปรบกวนภาพที่อ่านจากการทดลองครั้งต่อไป หลังจากทำการทดลองด้วยสารตัวอย่าง ZnO แล้ว จะทำการทดลองด้วยสารมาตรฐาน Al_2O_3 อีกครั้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากสารมาตรฐาน Al_2O_3 ไปแปลงข้อมูลจากสารตัวอย่าง ZnO ซึ่งเป็นข้อมูลในรูปแบบของค่าความเข้ม (arbitrary unit)(a.u.) กับ ระยะทาง (pixel) ให้กลายเป็นค่าความเข้ม (a.u.) กับมุม 2θ (degree) ให้มีค่ามาตรฐานและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการหาโครงสร้างของผลึกโดยได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 2 โดยข้อมูลที่ได้จากการรวมข้อมูลจาก 2 มิติ ให้เหลือเป็น 1 มิติ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.11 ในงานวิจัยชิ้นนี้สามารถสรุปวิธีการทดลองได้เป็นแผนภาพวิธีการทดลองทั้งหมดซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.12

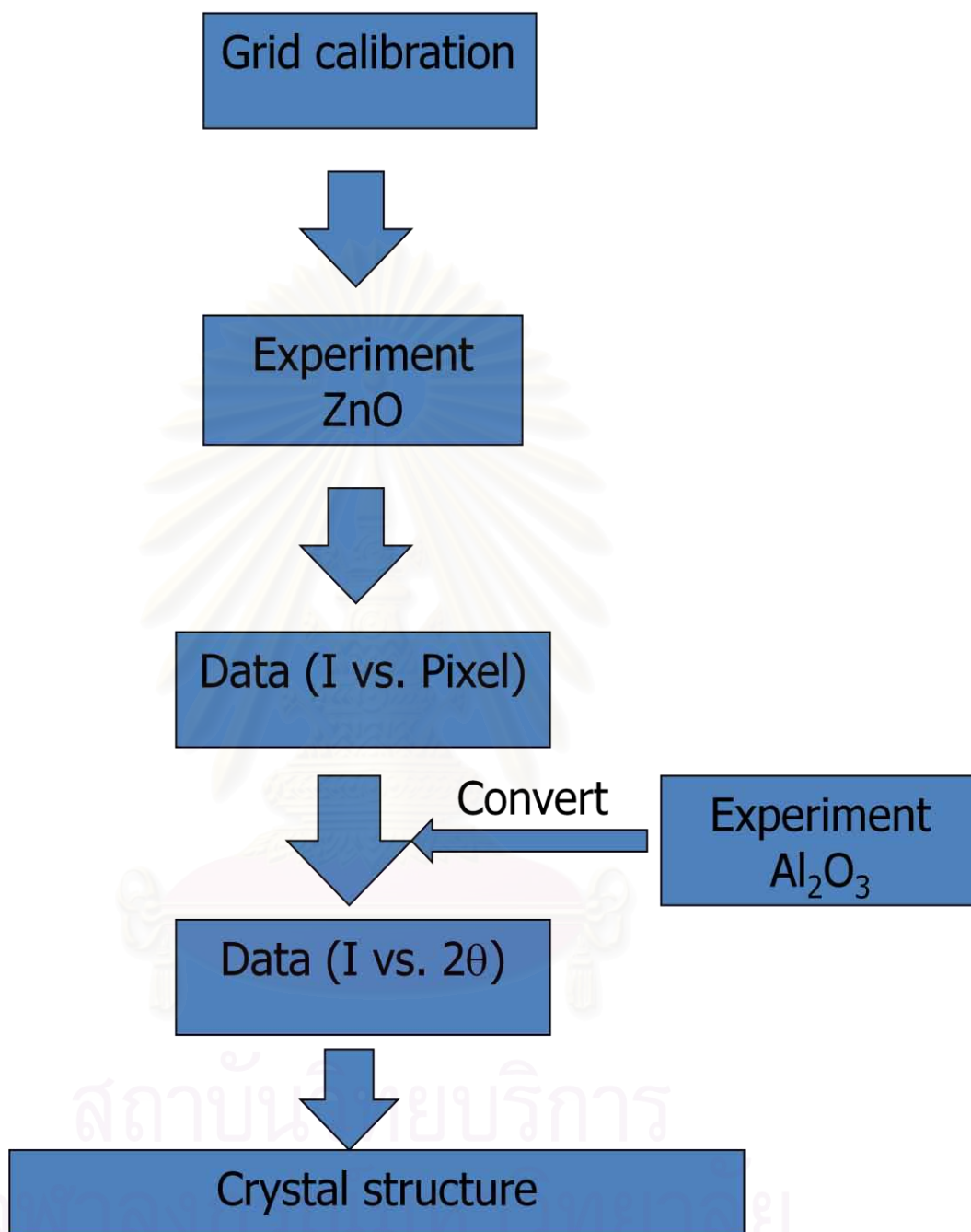


ก)



ข)

รูปที่ 4.11 แสดง ก) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนนิเมจเพลต ข) ผลการรวมข้อมูลจากรูป ก) โดยเป็น ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม กับระยะจากจุดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบ ด้วยโปรแกรม Edipus



รูปที่ 4.12 แสดงแผนภาพวิธีการทดลองในงานวิจัย

4.2 ขั้นตอนการหาโครงสร้างผลึกของสาร

จากหัวข้อที่ผ่านมา ข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชนิดกระจายมุม และการใช้อิมเมจเพลตเป็นอุปกรณ์บันทึกแถบการเลี้ยวเบนพบว่าข้อมูลที่ได้จากเทคนิคดังกล่าว คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมของแบรกก์ จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าสามารถระบุความเป็นไปได้ของโครงสร้างว่าเป็นโครงสร้างแบบใด สำหรับมุมของแบรกก์เมื่อพิจารณาจากกฎของแบรกก์แล้วสามารถหาค่าระยะห่างระหว่างระนาบที่เกิดจากการเลี้ยวเบน ตามดัชนีมิลเลอร์ได้จากรูปทรงทางเรขาคณิตของระบบแลตทิซของบราวส์ (Bravais lattice) ดังที่ได้เคยพิจารณาไปแล้วในบทที่ 2 ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของ Cubic ได้ความสัมพันธ์ว่า

$$d_{hkl} = \frac{a}{(h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}} \quad 4.1$$

ทั้งนี้สำหรับโครงสร้างแบบอื่นก็จะมีความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระนาบกับค่าคงที่แลตทิซเป็นไปตามรูปทรงทางเรขาคณิตของโครงสร้างนั้น ๆ ทั้งนี้ในทางปฏิบัติแล้ว การใช้โปรแกรมเพื่อระบุโครงสร้างทำให้การระบุโครงสร้างมีความสะดวกและง่ายขึ้น ในงานวิจัยนี้เองได้ใช้โปรแกรม DICVOL06 ในการระบุโครงสร้างในเบื้องต้น

Dicvol06

โปรแกรม Dicvol06 เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาโครงสร้างของผลึกเบื้องต้น และหาดัชนีระนาบของผลึก [15] ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวพัฒนาขึ้นโดย A. Bolutif และ D. Louer จาก University of Rennes ประเทศฝรั่งเศส โดยข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการหาโครงสร้างของผลึก คือ ค่ามุม 2θ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนจากสารตัวอย่าง โดยวิธีการคำนวณของโปรแกรม Dicvol06 เป็นดังนี้

พิจารณาสมการตามกฎของแบรกก์ และสมการที่แสดงถึงระยะห่างระนาบของผลึกในระบบต่างๆ ซึ่งในที่นี้จะใช้โครงสร้างผลึกแบบ Hexagonal เป็นตัวอย่าง

$$2d_{hkl} \sin \theta = \lambda \quad 4.2$$

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}}} \quad 4.3$$

โดยค่า a,b และ c เป็นค่าแลตทิซ พารามิเตอร์

รวม 2 สมการเข้าด้วยกันแล้วเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad 4.4$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$\sin^2 \theta = A^2(h^2 + hk + k^2) + Cl^2 \quad 4.5$$

โดย

$$A = \frac{\lambda^2}{3a^2}$$

$$C = \frac{\lambda^2}{4c^2}$$

จากสมการที่ 4.5 ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าก็คือ A,C,h,k และ l ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

เขียนตารางระหว่างค่า $\sin^2 \theta$ และคู่ค่าจำนวนเต็มที่เป็นไปได้ของ h และ k โดยกำหนดให้ l เป็น 0 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากนั้นพิจารณาค่าตัวเลขที่ซ้ำกันซึ่งแสดงไว้โดยเครื่องหมาย *

Line	$\sin^2 \theta$	$\frac{\sin^2 \theta}{3}$	$\frac{\sin^2 \theta}{4}$	$\frac{\sin^2 \theta}{7}$	h k l
1	0.097	0.032	0.024	0.014	
2	0.112*	0.037	0.028	0.016	
3	0.136	0.045	0.034	0.019	
4	0.209	0.070	0.052	0.030	1 1 0
5	0.332	0.111*	0.083	0.047	

ตารางที่ 4.2 แสดงวิธีการคำนวณหาดัชนีระบุนาบบของผลึกของโปรแกรม Dicvol06

ในตารางที่ 4.2 เพื่อหาค่า A ออกมาซึ่งค่า A ดังกล่าวจะเป็นข้อมูลคร่าวๆ ของค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ a และ b เนื่องจากค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการทดลองได้ทราบอยู่แล้ว จากนั้นจะทำการเขียนตาราง $\sin^2\theta$ ในทำนองเดียวกันเพื่อหาค่าคงที่ C จะทำให้สมการที่ 4.5 เหลือตัวแปรเพียง 3 ตัวนั่นคือ $h k l$ ซึ่งวิธีการหาค่า $h k l$ ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการสุ่มค่า $h k l$ ซึ่งมีค่าเป็นจำนวนเต็ม ลงในสมการที่ 4.5 โดยเลือกค่าที่มีความแตกต่างน้อยที่สุด จะทำให้สามารถทราบได้ว่าค่ายอดที่มุม 2θ ใดๆ เกิดจากการแทรกสอดจากระนาบใดในบราวส์แลตทิซแบบใด

Unitcell

Unitcell เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ ของผลึกซึ่งพัฒนาโดย T J B Holland และ S. A. T.Redfern[16] หลักการทำงานของ Unitcell คือ ใส่ข้อมูลของมุม 2θ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนจากสารตัวอย่างและค่าดัชนีระบุนาบบที่สอดคล้องกัน ซึ่งข้อมูลที่จำเป็นจะต้องใช้ในการคำนวณดังกล่าว สามารถหาได้จากผลที่ออกมาจากโปรแกรม Dicvol06 วิธีการคำนวณหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ ของโปรแกรม Unitcell สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 4.4

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}$$

ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของสมการ 4.4 ก็คือค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ a และ c ซึ่งสามารถหาได้จากการพิธสมการด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดลอง กับสมการที่ 4.4 จะทำให้ได้ค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ออกมา นี่เป็นส่วนหนึ่งของวิธีการคำนวณของโปรแกรมทั้งหมดที่ใช้ในการวิจัยขั้นนี้ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้ว จะใช้ข้อมูลที่เกี่ยวกับค่าตำแหน่งมาคำนวณเท่านั้น เนื่องจากวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กรดเป็นการปรับแก้ในส่วนของตำแหน่ง

สำหรับความเข้มของรังสีเอกซ์จากการทดลองนั้น เป็นข้อมูลที่สามารถบ่งบอกชนิดและตำแหน่งของอะตอม โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม (I_{hkl}) และแฟคเตอร์โครงสร้าง (Structure factor, F_{hkl}) ซึ่งมีความสัมพันธ์กัน คือ $I_{hkl} \propto |F_{hkl}|^2$ โดยที่แฟคเตอร์โครงสร้างแสดงดังสมการที่ 4.6

$$F_{hkl} = \sum_j f_j \exp 2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j) \quad 4.6$$

เมื่อ f_j คือ แฟคเตอร์การกระเจิงของอะตอม j (atomic scattering factor) ซึ่งขึ้นอยู่กับเลขอะตอม

x_j, y_j, z_j คือ ตำแหน่งของอะตอม j ในพิกัด (x, y, z)

การที่จะรู้ว่าโครงสร้างที่สมบูรณ์ของสารนั้น จำเป็นที่จะต้องรู้ตำแหน่งที่แน่นอนของอะตอม ซึ่งปริมาณที่บ่งบอกตำแหน่งของอะตอมได้ก็คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง (Electron density, $\rho(x, y, z)$) ทั้งนี้สามารถหาความหนาแน่นอิเล็กตรอนได้จากสมการที่ 4.7

$$\rho(x, y, z) = \frac{1}{V} \sum_{h_{\min}}^{h_{\max}} \sum_{k_{\min}}^{k_{\max}} \sum_{l_{\min}}^{l_{\max}} |F_{hkl}| \cos[2\pi(hx + ky + lz) - \alpha_{hkl}] \quad 4.7$$

เมื่อ α_{hkl} คือ มุมเฟสของระนาบ (hkl)

จากสมการที่ 4.7 พบว่าปริมาณที่ไม่ทราบค่าก็คือ มุมเฟส แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถแก้ค่าหามุมเฟสได้ด้วย วิธีการพิจารณาค่าความเข้มสัมพัทธ์ (relative intensity) โดยจะอ้างอิงกับผลการทดลองเป็นหลัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

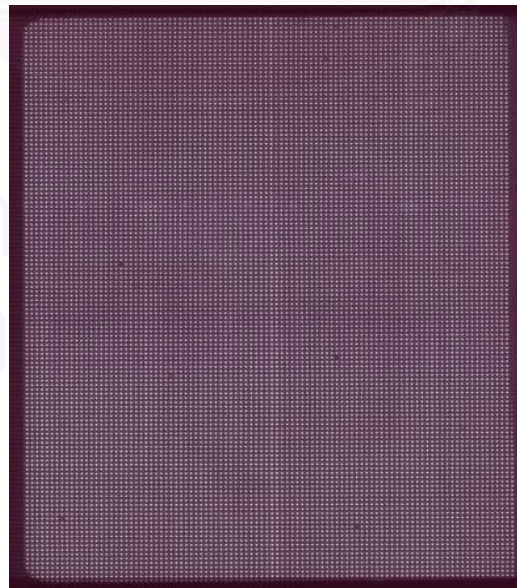
บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การนำวิธีการปรับแต่งเครื่องอ่านอิเมจเพดเพื่อปรับแต่งให้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกผงที่ความดัน บรรยากาศ สำหรับพัฒนาและนำไปใช้ในการทดลองศึกษาโครงสร้างของผลึกผงภายใต้สภาวะความดันสูงในงานวิจัยชิ้นนี้ แบ่งขั้นตอนออกเป็น ส่วนหลักๆ 3 ส่วนด้วยกัน คือ การปรับแต่งเครื่องอ่านอิเมจเพดโดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด การทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยใช้เครื่องอ่านอิเมจเพดที่ปรับแต่งแล้วมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และการหาโครงสร้างของสารตัวอย่าง ZnO โดยสามารถจะแบ่งข้อมูลที่ได้จาก ส่วนต่างๆ ออกเป็นส่วนย่อย ดังนี้

5.1 ผลการปรับแต่งเครื่องอ่านอิเมจเพดโดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด

ในส่วนนี้จะแสดงถึงผลจากการทดลอง การปรับแต่งเครื่องอ่านอิเมจเพด โดยการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด โดยผลที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์ผ่านแผ่นนิกเกิลที่เจาะรูลงไปยังอิเมจเพด แสดงได้ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงจุดกริดบนอิเมจเพดที่เกิดจากการฉายคลื่นรังสีเอกซ์ร้าวไอเลตผ่านแผ่น นิกเกิลลงบนอิเมจเพด

ข้อมูลที่อ่านได้จากเครื่องอ่านอิมเมจเพลตแล้วนำมาอ่านด้วยโปรแกรม Edipus จะเห็นได้ว่าจุดทุกจุดที่เกิดจากการ เทียบมาตรฐานโดยใช้กริด มีลักษณะค่อนข้างชัดเจนและมีความสม่ำเสมอกันแทบทุกจุดบนอิมเมจเพลต หลังจากได้ภาพข้างต้นจะทำการแปลงไฟล์ของภาพจุดบนอิมเมจเพลตดังกล่าวเพื่อหาตำแหน่งที่ถูกต้องที่สุดบนอิมเมจเพลตในรูปของพิกเซล โดยพิกเซลในความหมายของงานวิจัยชิ้นนี้ก็คือจุดของเลเซอร์ ซึ่งมีขนาดประมาณ $88 \times 87 \mu\text{m}$ ซึ่งนำไปใช้ร่วมกับโปรแกรม Edipus สำหรับการรวมข้อมูลจาก 2 มิติ ให้เหลือ 1 มิติ โดยวิธีการนำไฟล์ภาพของจุดมาใช้คือ การกำหนดจุดกริดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายที่จะทำการคำนวณซึ่งอ่านได้จากโปรแกรม Edipus หลังจากนั้นจะข้อมูลที่ได้เข้าไปใช้ในโปรแกรม grid ซึ่งตัวโปรแกรมจะทำการคำนวณเพื่อหาสมการที่จะนำไปใช้ในการแก้ไขตำแหน่งในรูปของพิกเซลให้ถูกต้อง เนื่องจากระยะห่างระหว่างจุดสามารถทราบได้ เพราะมีค่าเท่ากับระยะห่างของรูบนแผ่นนิกเกิล คือ 1.977 mm โดยผลจากการใส่ข้อมูลลงในโปรแกรม grid เป็นดังรูปที่ 5.2

```
Fitting 11234 grid points
The plate offset has been added to the following X & Y
Pixel range in X : 970.02 3095.91
Pixel range in Y : 967.19 3712.63
Parameters for "position" will be written to "grid.par"
Fitting X values of grid points
RMS deviation = 46.32um          Max. deviation = 178.92um
Fitting Y values of grid points
RMS deviation = 15.46um          Max. deviation = 60.41um
```

Statistics for least-squares fit to grid points

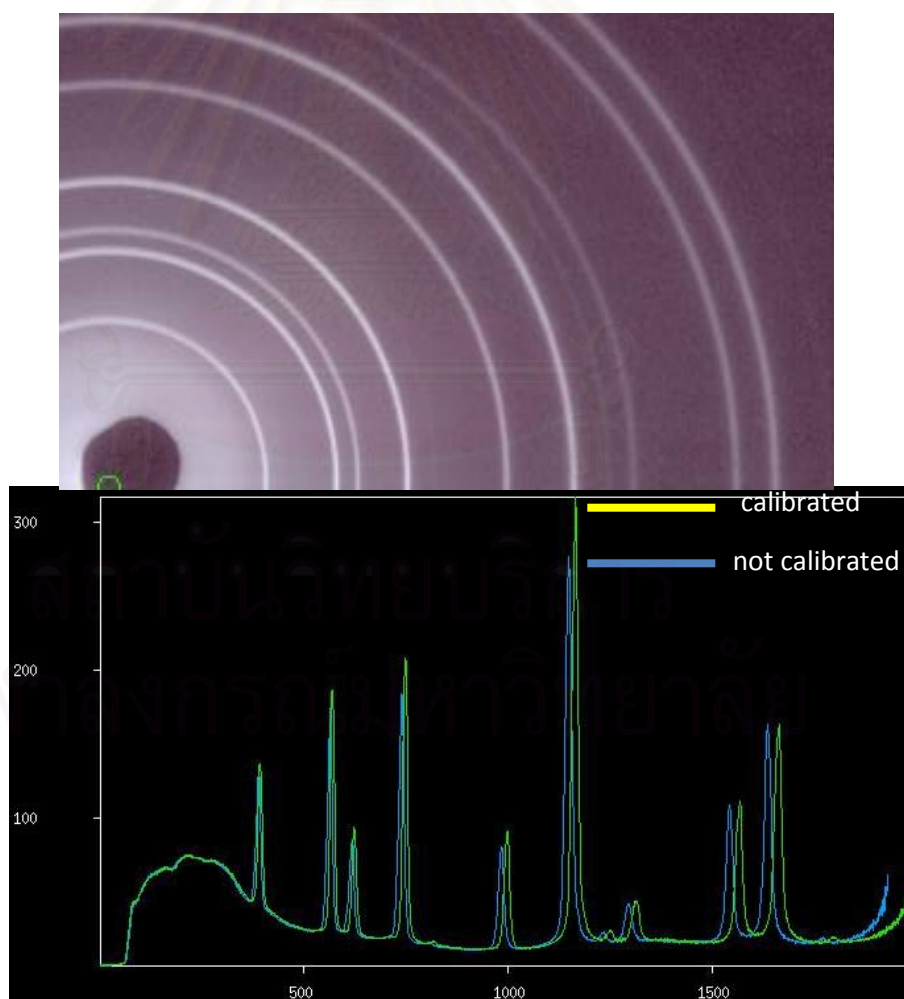
```
11234 grid points more than 0 um from fitted position
10453 grid points more than 10 um from fitted position
8537 grid points more than 20 um from fitted position
3527 grid points more than 50 um from fitted position
371 grid points more than 100 um from fitted position
0 grid points more than 200 um from fitted position
0 grid points more than 500 um from fitted position
0 grid points more than 1000 um from fitted position
```

ค่าจำนวนจุดที่คลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่วัด
จากสมการ

รูปที่ 5.2 แสดงภาพจากโปรแกรม grid ที่ทำการฟิตตำแหน่งในรูปของพิกเซลบนอิมเมจเพลต

จากรูปที่ 5.2 จะเห็นว่าจำนวนจุดพิกเซลที่เพิ่มขึ้นไปมากที่สุดจะอยู่ใน ช่วง 100 μm หรืออาจกล่าวได้ว่ามีตำแหน่งบนอิเมจเพลต 371 ตำแหน่งที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 100 μm หรือเพิ่มขึ้นไปประมาณ 1 พิกเซล ซึ่งคิดเป็น $\frac{371}{34122} \times 100 = 1.08\%$ ของอิเมจเพลตทั้งแผ่น ซึ่งส่วนที่เหลือสามารถระบุตำแหน่งได้ค่อนข้างดี ดังนั้นการ เทียบมาตรฐานโดยใช้กริด น่าจะนำไปใช้ในการทดลองเพื่อหาโครงสร้างของผลึกผงภายใต้ความดันบรรยากาศได้

หลังจากทำการปรับแต่งเครื่องอ่านอิเมจเพลต ด้วยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด จะทำการทดสอบผลของการ ปรับแต่ง ด้วยการทดสอบรวมข้อมูลของสารมาตรฐาน Al_2O_3 โดยใช้ข้อมูลที่ได้ทำจากการปรับแต่งกับการรวมข้อมูลโดยไม่ใช้ข้อมูลดังกล่าวแล้วนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบของวงแหวน Debye Scherrer ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.3

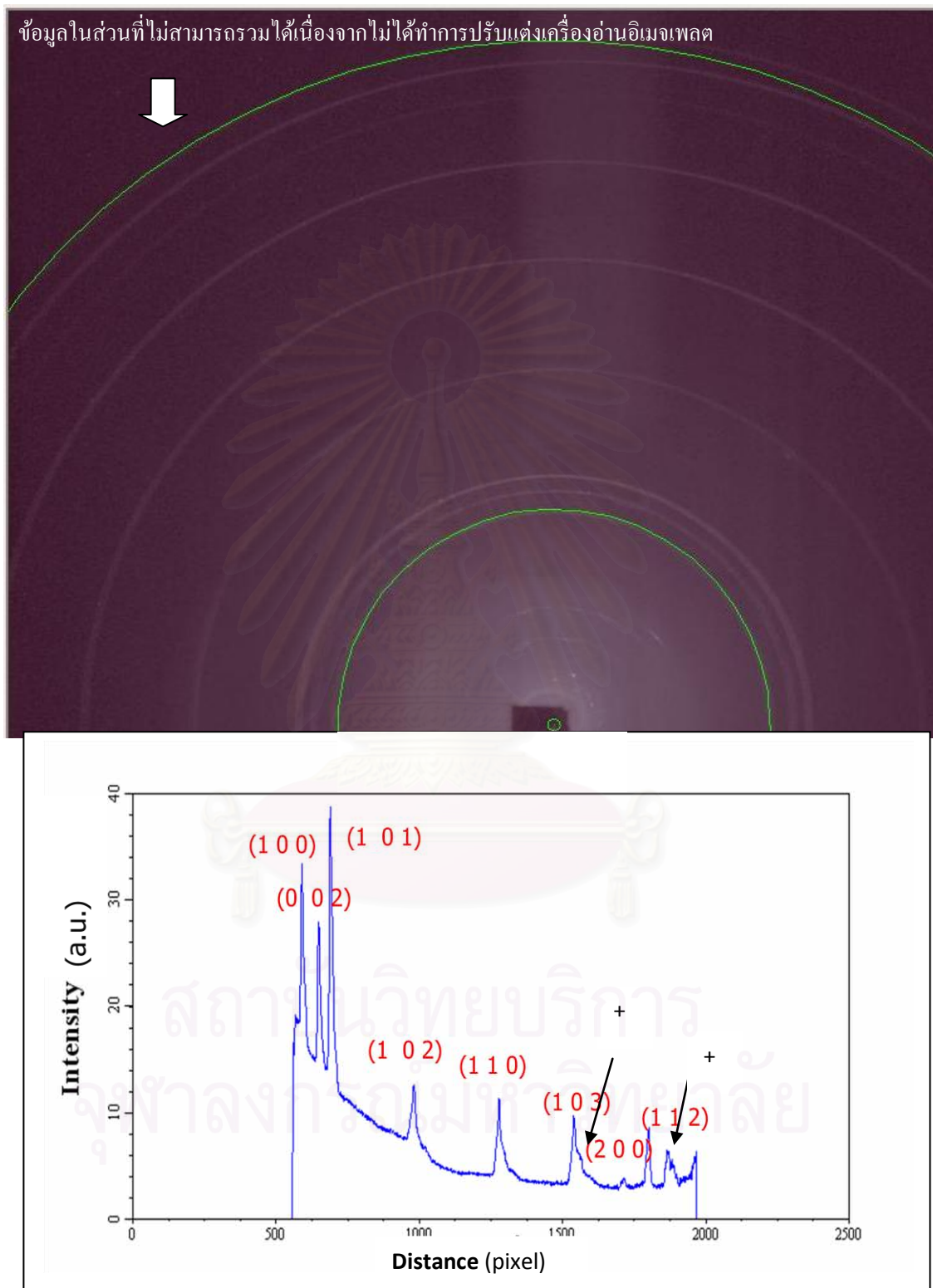


รูปที่ 5.3 แสดงข้อมูลใน 1 มิติ ของยอดที่ตรงกับวงแหวน Debye Scherrer

หลังจากการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด เพื่อปรับแก้ตำแหน่งของฟิสิกเซลบนอิเมจเพลต เมื่อทำการรวมข้อมูลแล้วตำแหน่งของ ยอดที่ได้จากการใช้ข้อมูลดังกล่าว จะตรงกับตำแหน่งจริง บนอิเมจเพลตและรูปร่างของยอดมีสมมาตรที่ดีกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการ เทียบมาตรฐานโดยใช้กริด มีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการทดลองที่ต้องการการแยก ชัดที่ดี เพื่อวิเคราะห์ โครงสร้างของผลึกผง

ปัญหาอีกประการหนึ่งที่เกิดจากการอ่านอิเมจเพลต โดยใช้เครื่องอ่านอิเมจเพลตที่ไม่ได้ ทำการปรับแต่ง มาใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลึกภายใต้ความดันบรรยากาศ คือ การไม่สามารถปรับแก้ค่าความเอียงของเพลตในขั้นตอนของการรวมข้อมูลให้เป็น 1 มิติ ซึ่งมีสาเหตุมาจากในขณะทำการทดลอง อิเมจเพลตซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับในการทดลอง ไม่ได้ตั้งฉากกับ ลำแสงตกกระทบ (incident beam) จริงๆตามทฤษฎี สาเหตุดังกล่าวนี้เองทำให้วงแหวนการแทรกสอด Debye Scherrer บนอิเมจเพลตมีลักษณะเป็นวงรี แทนที่จะมีลักษณะเป็นวงกลมโดย สมบูรณ์ และจะทำให้เกิดข้อมูลของยอดที่ผิดเพี้ยนไปจากข้อมูลจริงบนอิเมจเพลต ในขณะทำการ รวมข้อมูล เพราะไม่สามารถรวมข้อมูลบนอิเมจเพลตได้ซึ่งเกิดจากการไม่ทราบตำแหน่งจริงบนอิ เมจเพลตนี้เอง ความเอียงของอิเมจเพลตเรียกว่ามุมเอียง (tilt) วงแหวน Debye Scherrer บนอิ เมจเพลตที่มีลักษณะไม่เป็นวงกลมแสดงดังรูปที่ 5.4 และการรวมข้อมูลโดยไม่ได้ทำการปรับแต่ง เครื่องอ่านอิเมจเพลตได้แสดงไว้คู่กัน โดยจะเห็นยอดที่เกิดจากการรวมข้อมูลผิดพลาดแสดงไว้ใน รูป โดยใช้เครื่องหมาย + เป็นตัวบอกตำแหน่งของยอดที่เกิดขึ้นมานี้ ถ้าพิจารณารูปร่างและ สมมาตรของยอดจะเห็นได้ว่าการผิดเพี้ยนของข้อมูลเกิดขึ้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อ การหาโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างในขั้นตอนถัดไปได้

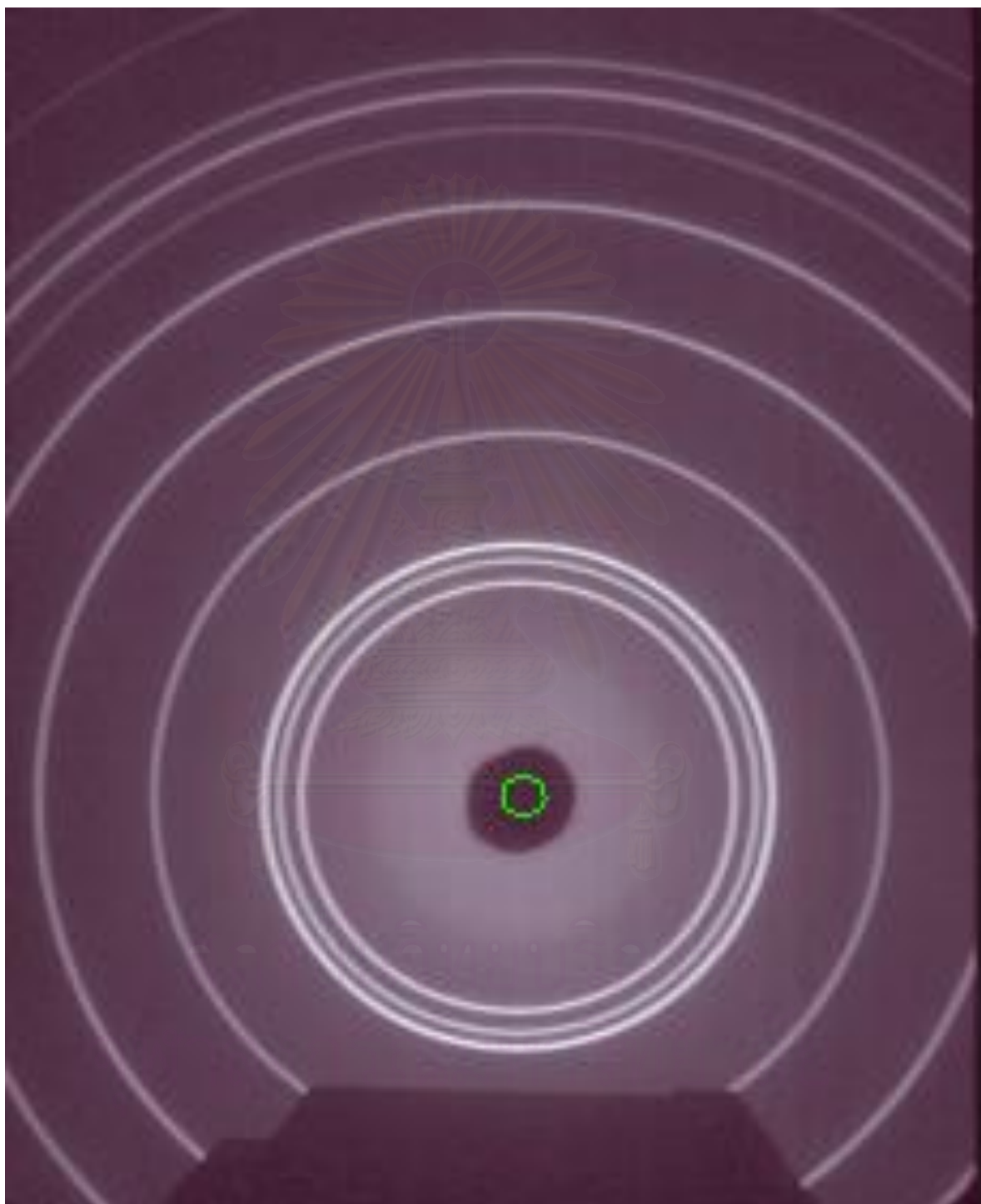
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



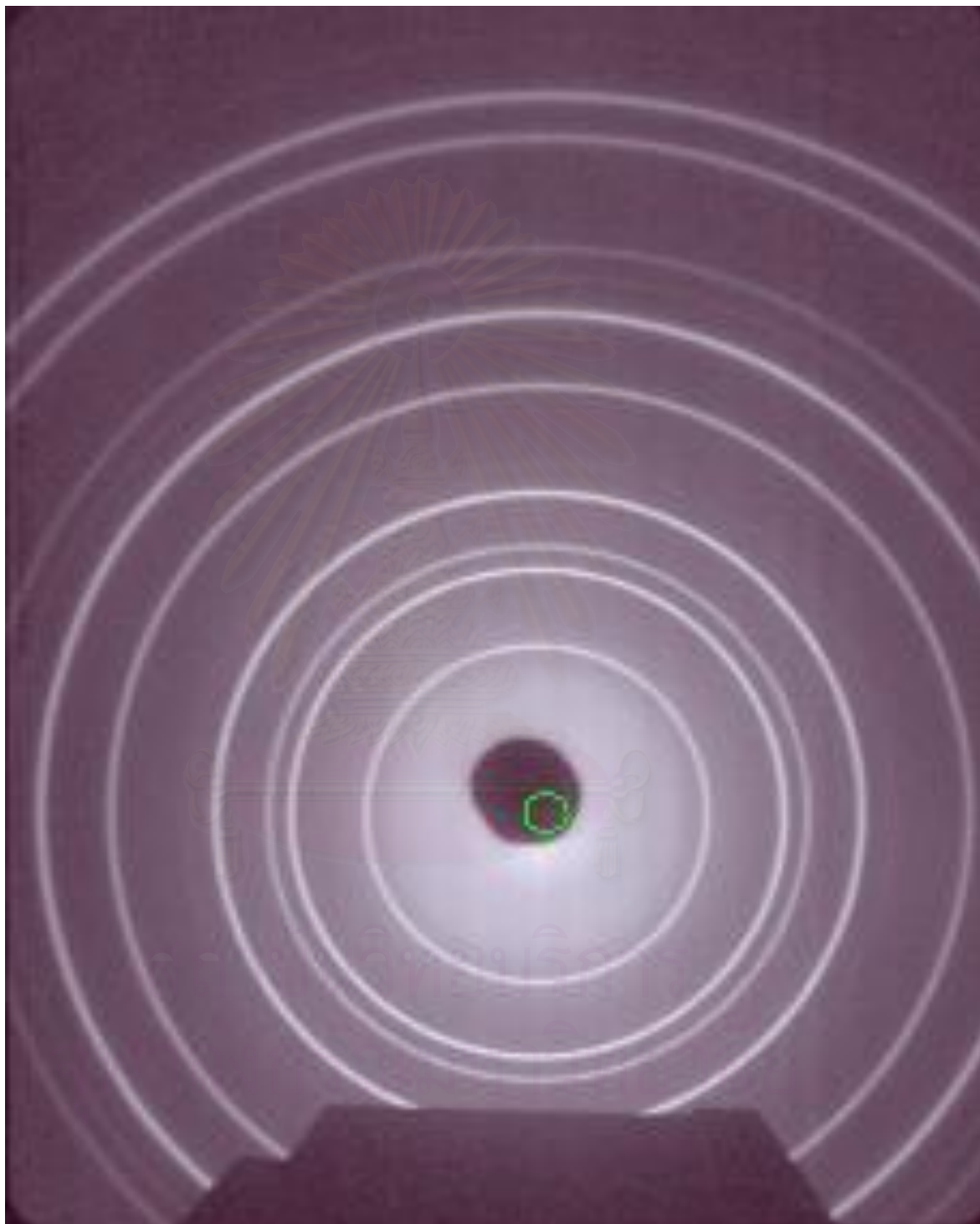
รูปที่ 5.4 แสดงภาพวงแหวนการแทรกสอดบนอิมเมจเฟลตที่มีลักษณะเอียง และข้อมูลที่ได้จากการรวมข้อมูลจากเฟลตดังกล่าว เครื่องหมาย + หมายถึง ยอดที่เกิดจากการรวมข้อมูลคลาดเคลื่อน

5.2 ผลการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อนำไปใช้หาโครงสร้างของผลึกผง ZnO

สารตัวอย่างผลึกผง ZnO ที่ถูกนำมาทำการทดลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เพื่อศึกษาโครงสร้าง โดยทำการทดลองด้วยรังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่น 1.377 \AA ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งนำสารมาตรฐาน Al_2O_3 มาใช้ประกอบเพื่อทำการแปลง ผนัค่าระยะทาง (pixel) ให้เป็นค่ามุม 2θ (degree) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 สารมาตรฐาน Al_2O_3 มีโครงสร้างเป็น trigonal โดยมีสมมาตรเป็น $R\bar{3}C$ และมีค่าคงที่แลตทิซ $a = 4.763 \text{ \AA}$ $b = 4.763 \text{ \AA}$ และ $c = 13.000 \text{ \AA}$ [18] สาเหตุที่เลือก Al_2O_3 มาเป็นสารมาตรฐานสำหรับการแปลง ผนัค่าเพราะสาร Al_2O_3 มีจำนวนแถบการเลี้ยวเบนที่เยอะสำหรับการวางอิเมจเพลตที่ระยะห่างจากแท่นวางสารตัวอย่าง 7 cm ผลการจากทดลองเพื่อพิจารณาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของสารตัวอย่างในรูปผลึกผง ZnO และสารมาตรฐาน Al_2O_3 แสดงดังรูปที่ 5.5 และ 5.6

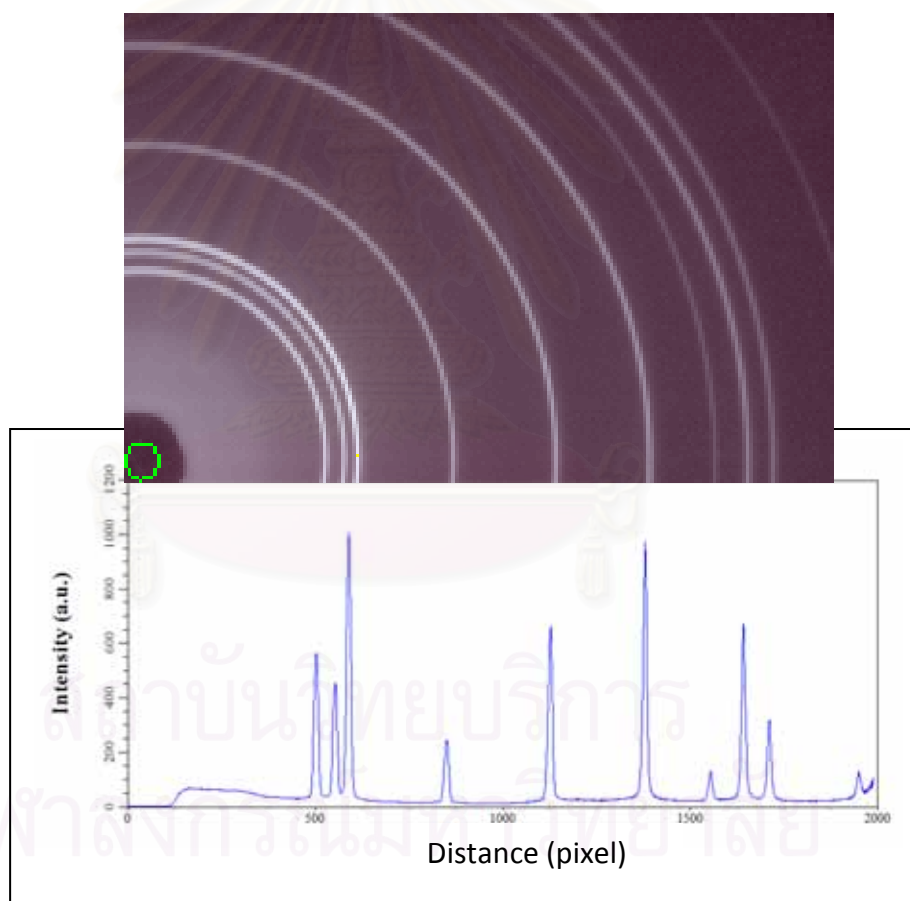


รูปที่ 5.5 แสดงวงแหวน Debye Scherrer บนฟิล์มเคลือบที่ได้จากการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารตัวอย่าง ZnO

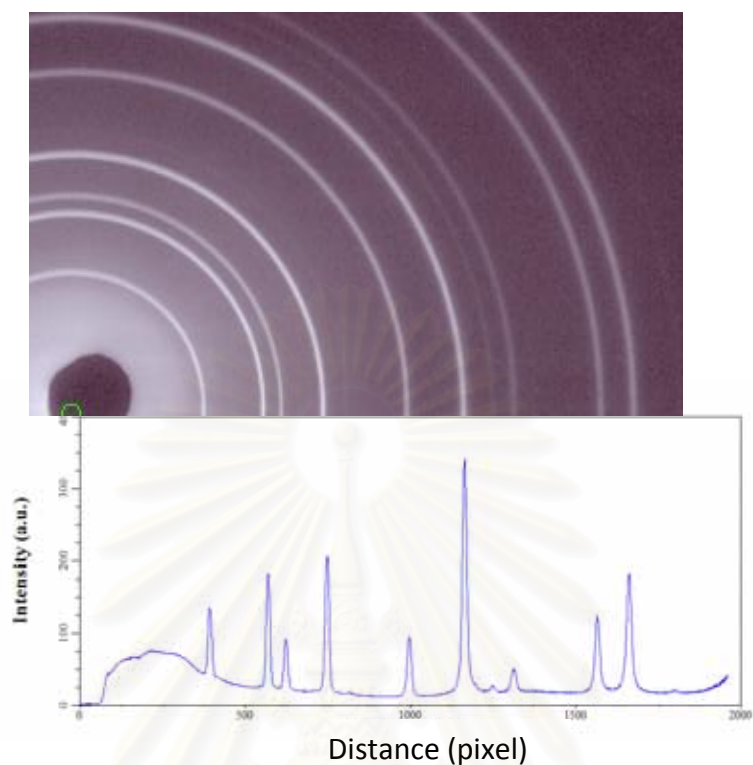


รูปที่ 5.6 แสดงวงแหวน Debye Scherrer บนฟิล์มเฟลตที่ได้จากการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารมาตรฐาน Al_2O_3

ถัดจากการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จะทำการรวมข้อมูลของวงแหวน Debye Scherrer ที่ได้จากเครื่องอ่านอิมเมจเพลต จาก 2 มิติ ให้เหลือเพียง 1 มิติ โดยรูปที่ 5.7 แสดงข้อมูลในรูปแบบ 1 มิติ และวงแหวนการเลี้ยวเบนบนอิมเมจเพลตที่ตรงกันด้วยโปรแกรม Edipus โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด มาปรับแก้ค่าตำแหน่งที่อ่านได้ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะมีทั้งของสารตัวอย่าง ZnO และ สารมาตรฐาน Al_2O_3 ข้อมูลที่ได้จากสารตัวอย่างจะนำไปใช้เพื่อศึกษาโครงสร้าง ส่วนข้อมูลที่ได้จากสารมาตรฐานจะนำไปใช้เพื่อแปลงผันค่า ระยะทาง (pixel) ให้เป็น 2θ (degree)

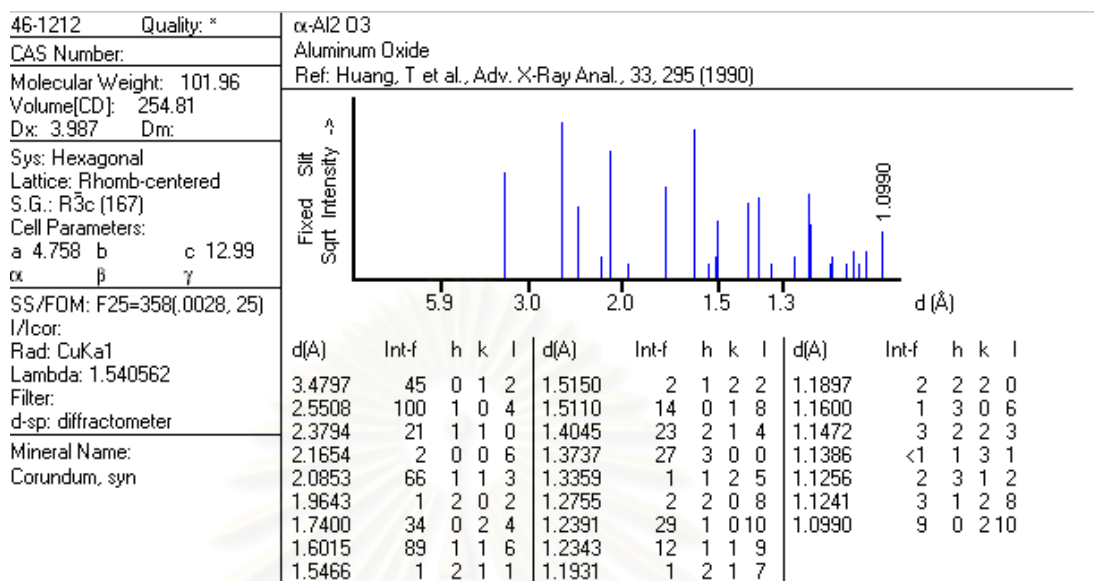


รูปที่ 5.7 แสดงกราฟการรวมข้อมูลของวงแหวนการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่าง ZnO คู่กับรูปวงแหวนการเลี้ยวเบนของ ZnO บนอิมเมจเพลต

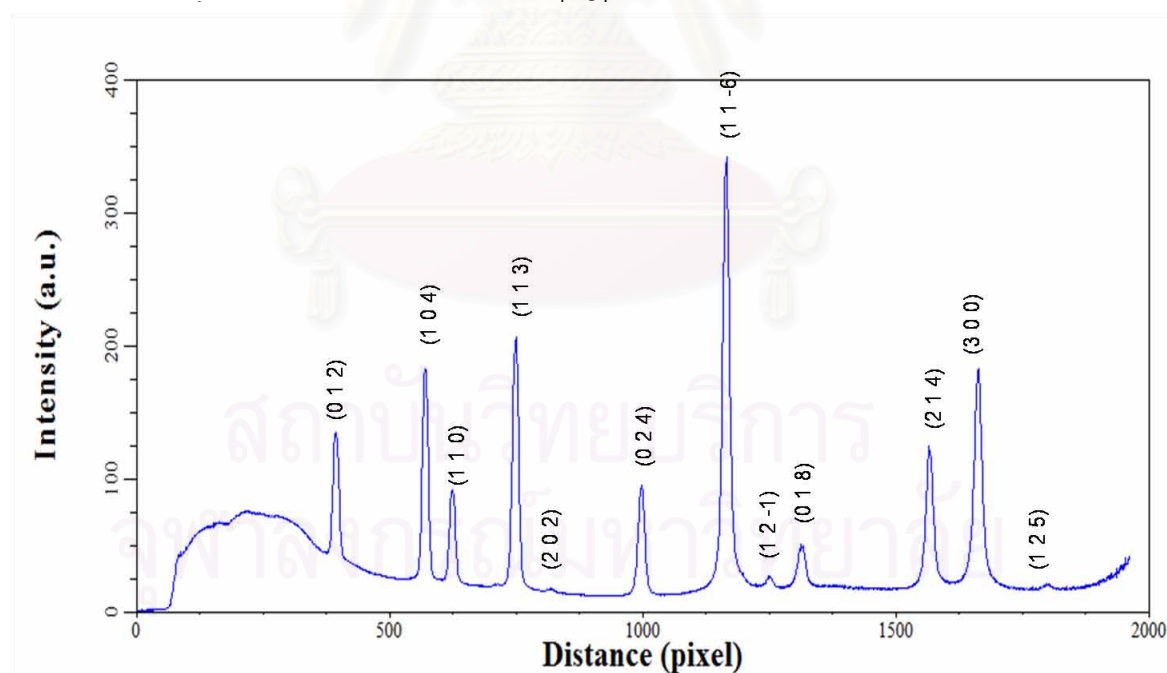


รูปที่ 5.8 แสดงกราฟการรวมข้อมูลของวงแหวนการเลี้ยวเบนของสารมาตรฐาน Al_2O_3 คู่กับรูปวงแหวนการเลี้ยวเบนของ Al_2O_3 บนอิเมจเพลต

สำหรับการแปลงค่าระยะทาง (pixel) ไปเป็นค่ามุม 2θ (degree) สามารถทำได้โดยการพิจารณารูปของข้อมูลการเลี้ยวเบนของสารมาตรฐาน Al_2O_3 โดยเทียบกับข้อมูลที่ได้จากฐานข้อมูลมาตรฐานที่ Cooper M.J. และ Huang, T [17,18] ได้ทำการทดลองไว้ โดยกราฟที่ได้จากการคำนวณด้วยฐานข้อมูลดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 5.9 โดยจากการเปรียบเทียบตำแหน่งของยอดที่ได้จากการคำนวณ กับ ยอดที่ได้จากการทดลองทำให้สามารถระบุดัชนีระนาบผลึก ในรูปของ (h k l) ได้ๆ ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงผลการคำนวณค่าระยะห่างของ ระนาบผลึกสำหรับ ยอดของการเลี้ยวเบน และดัชนีระนาบของผลึกที่สอดคล้องกัน [18]



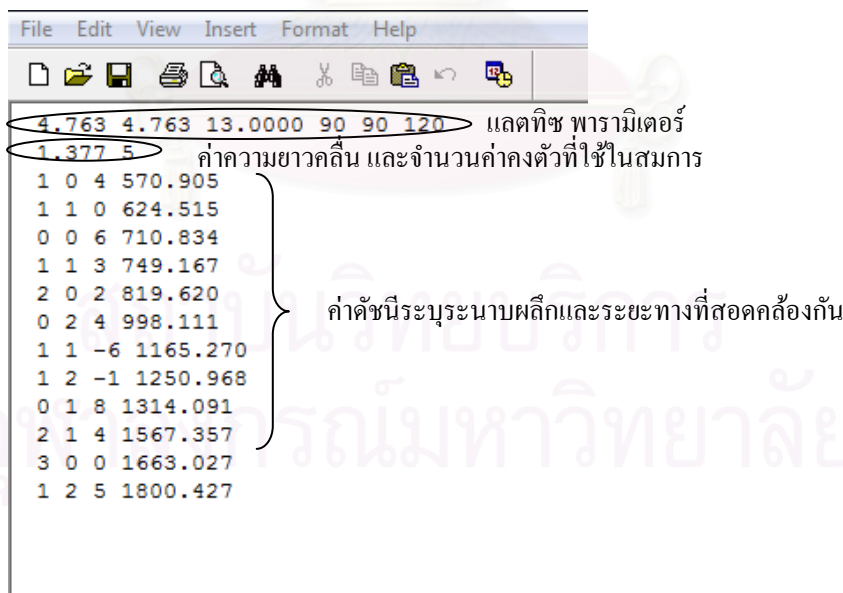
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงข้อมูลของการเลี้ยวเบนของสารมาตรฐาน Al₂O₃ และดัชนีระนาบผลึก

เมื่อทราบดัชนีระบุนานาของผลึก สามารถแปลงค่าระยะทางให้เป็นค่ามุมได้โดยการพิตตำแหน่งของแต่ละยอดด้วยโปรแกรม XRDA [19,20] โดยใช้ฟังก์ชัน Gaussian และ Lorentzian (Pseudo-Voigt) จะทำให้ได้ค่าระยะทางจากจุดศูนย์กลางของวงแหวน Debye Scherrer ของแต่ละยอด และจากสมการที่ 5.1,5.2 จะทำให้ทราบว่าค่ามุมของแต่ละยอดที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่าใด หลังจากนั้นจะทำการพิตค่ามุมดังกล่าวด้วยฟังก์ชันพหุนามในดีกรี 3 หรือ 4

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad 5.1$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2+hk+k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad 5.2$$

ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้โปรแกรมที่ชื่อว่า Calib เพื่อทำการแปลงค่าระยะทางให้เป็นค่ามุม โดยวิธีการข้างต้น วิธีการทำงานของโปรแกรมหากล่าวจะทำโดยการป้อนข้อมูล ค่าความยาวคลื่น ค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ ดัชนีระบุนานาผลึกและค่าระยะทางในหน่วยพิกเซลที่สอดคล้องกับระนาบนั้น ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งในการเลือกข้อมูลมาใส่ในโปรแกรม Calib จะเลือกเฉพาะยอดที่ความสมมาตรค่อนข้างดี และมีค่าความเข้มสูงเพื่อลดความคลาดเคลื่อน หลังจากทำการแปลงค่าระยะทางไปเป็นมุมดังที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.13 และผลของการแปลงข้อมูลแสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.11 แสดงหน้าต่างข้อมูลที่ใช้สำหรับ โปรแกรม Calib เพื่อใช้ในการแปลงค่าระยะทางให้เปลี่ยนเป็นค่ามุม

```

C:\Users\LookMeaw\Desktop\calib file 2\calib.exe
c[0] = -0.000434569646468
c[1] = 0.0668031675103
c[2] = -2.11569111273e-005
c[3] = 2.38849060155e-011
c[4] = 9.66721147075e-013

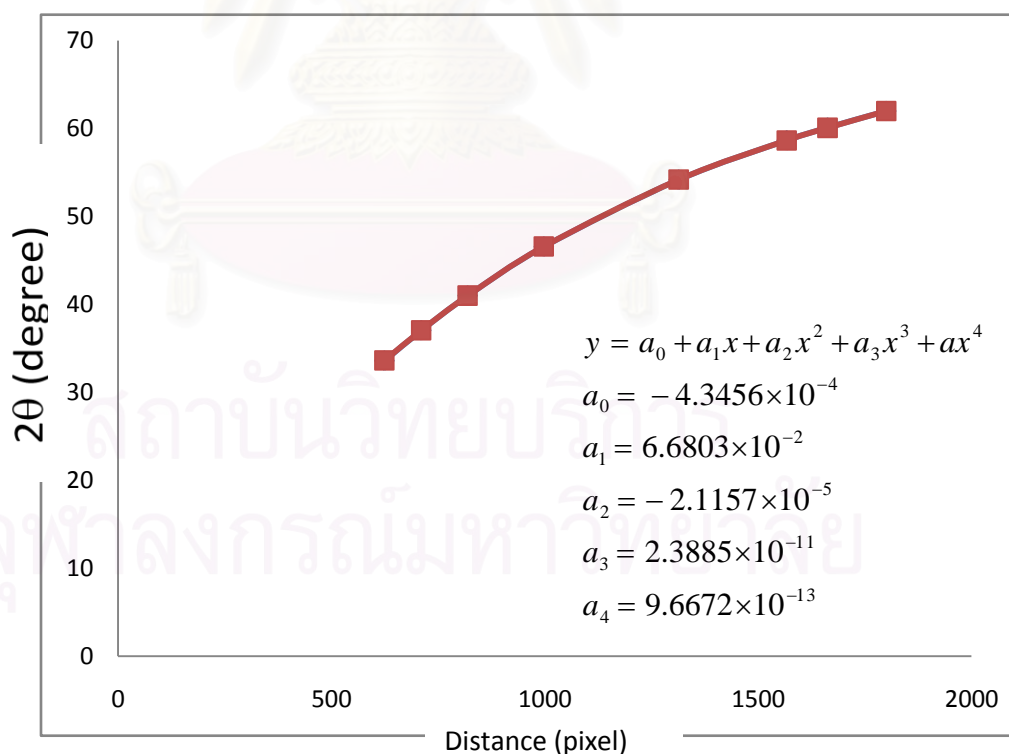
Chi-squared = 0.000600059759

  h  k  l  pixels  Two-theta(obs)  Two-theta(calc)  (obs-calc)
-----
  0  0  0    0.00    0.0000000    -0.000435    0.000435
  1  1  0  624.52   33.608585    33.620419   -0.011834 *
  2  0  0   710.83   37.056141    37.050654    0.005487
  3  2  0   819.62   41.002724    40.989469    0.013254 *
  4  0  2   998.11   46.578495    46.582674   -0.004179
  5  0  1  1314.09   54.179409    54.187431   -0.008022
  6  2  1  1567.36   58.654430    58.655796   -0.001365
  7  3  0  1663.03   60.098198    60.086417    0.011781 *
  8  1  2  1800.43   61.984535    61.990154   -0.005619

Asterisks mark points that have an absolute misfit of
greater than 0.01 degrees.
Is the fit good enough? (y/n):

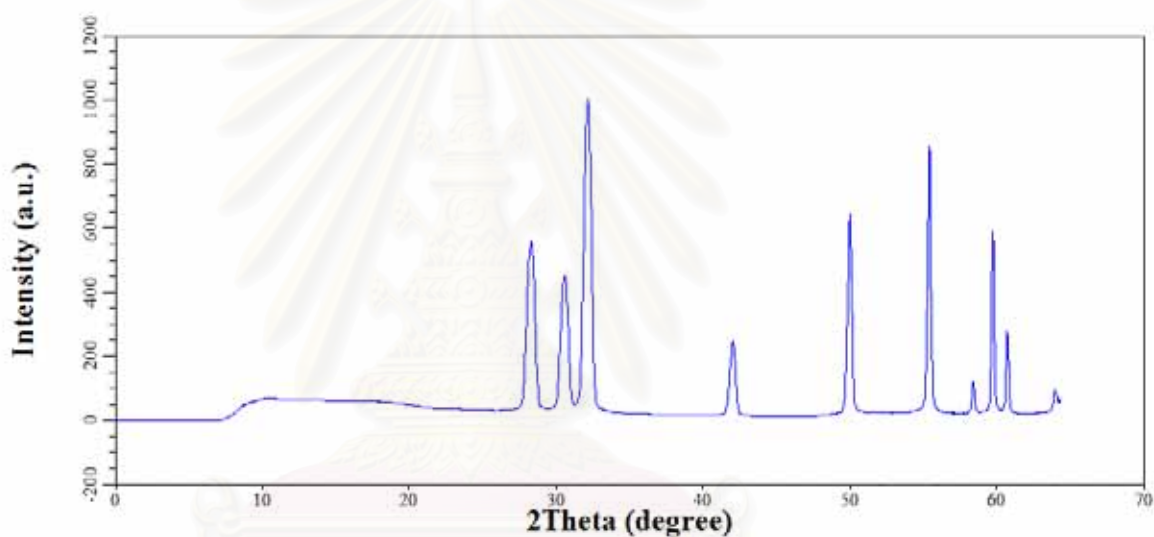
```

รูปที่ 5.12 แสดงผลจากโปรแกรม Calib โดยเครื่องหมาย * หมายถึงยอดที่มีค่ามุมที่มีผลต่างเกินกว่า 0.01 องศา



รูปที่ 5.13 แสดงกราฟระหว่างค่า มุม 2θ และ ค่าระยะทาง สำหรับใช้ในการแปลงข้อมูล

จากรูปที่ 5.13 ซึ่งแสดงผลของการพิตค่าระยะทางกับค่ามุม เพื่อหาสมการของการแปลง นั้นค่าพบว่าค่ามุมที่เพิ่มขึ้นไปจากค่าที่คำนวณจากทฤษฎีมีค่ามากที่สุด = 0.013254 องศา ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยโดยค่ามุมสำหรับการทดลองที่มีการแยก ชัดที่ดีจะอยู่ที่ประมาณ 0.01 องศา ดังนั้นสมการที่ใช้ในการแปลงค่าระยะทางเป็นค่ามุมนั้นจะมีความแม่นยำค่อนข้างสูง โดยผลของการแปลงค่าระยะทาง (pixel) เป็น ค่ามุม (degree) ของสารตัวอย่าง ZnO ได้แสดงดังรูปที่ 5.14 ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้จะนำไปใช้ในการศึกษาเพื่อหาโครงสร้างของผลึกของ ZnO ต่อไป

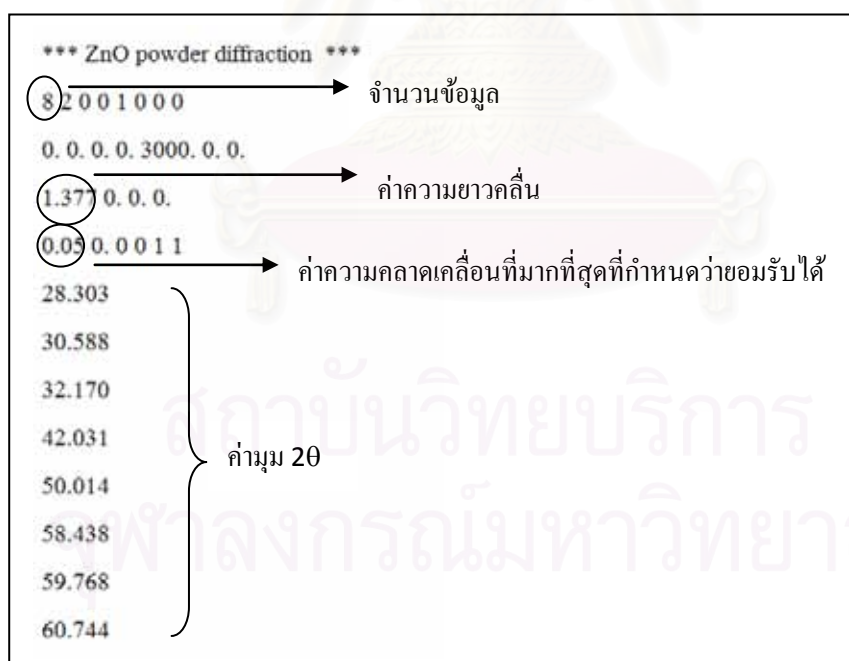


รูปที่ 5.14 แสดงยอดของการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่าง ZnO ที่ได้จากการใช้สารมาตรฐาน Al_2O_3 เป็นตัวแปลงข้อมูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 การหาโครงสร้างของสารตัวอย่าง ZnO

ขั้นตอนต่อไปในงานวิจัยชิ้นนี้จะนำข้อมูลของสารตัวอย่าง ZnO ที่ใช้ข้อมูลของสารมาตรฐาน Al_2O_3 มาแปลงผันข้อมูลให้ได้เป็นข้อมูลระหว่าง ค่าความเข้ม (a.u.) กับ มุม 2θ (degree) จากนั้นนำมาวิเคราะห์โครงสร้างของสารตัวอย่าง ZnO ซึ่งขั้นตอนแรกในการวิเคราะห์โครงสร้างจะเริ่มโดยการพิจารณาพีคระหว่างค่าความเข้ม กับ มุม 2θ โดยใช้โปรแกรม XRDA จะทำให้ได้ค่ามุม 2θ ที่แท้จริงของแต่ละยอด และในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้โปรแกรม DICVOL06 เพื่อหาว่าสาร ZnO มีโครงสร้างของเซลล์หนึ่งหน่วยเป็นรูปแบบใดใน ระบบบราวน์แลตทิซในเบื้องต้น โดยข้อมูลที่จำเป็นจะต้องใส่เข้าไปในตัวโปรแกรม DICVOL06 ก็ค่ามุม 2θ ของแต่ละ ยอดของการเลี้ยวเบน ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.15 โดยผลจากการคำนวณเพื่อหาโครงสร้างในเบื้องต้นซึ่งแสดงในรูปที่ 5.16 พบว่าสารตัวอย่าง ZnO มีโครงสร้างในระบบบราวน์แลตทิซเป็น Hexagonal โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดว่ายอมรับได้เท่ากับ 0.05 องศา



รูปที่ 5.15 แสดงหน้าต่างข้อมูลที่ใช้สำหรับการหาโครงสร้างของผลึกด้วยโปรแกรม DICVOL06

SOLUTION NUMBER 1 / 1									
HEXAGONAL SYSTEM									
DIRECT PARAMETERS : A= 3.25843 C= 5.23081 VOLUME= 48.10									
STANDARD DEVIATIONS : 0.00109 0.00487									
REFINED ZERO-POINT SHIFT :-0.0224 deg. 2-theta									
H	K	L	DOBS	DCAL	DOBS-DCAL	2TH.OBS	2TH.CAL	DIF.2TH.	
1	0	0	2.81610	2.81969	-0.00359	28.303	28.266	0.037	
0	0	2	2.61021	2.61354	-0.00333	30.588	30.548	0.040	
1	0	1	2.48499	2.48186	0.00314	32.170	32.212	-0.042	
1	0	2	1.91986	1.91724	0.00261	42.031	42.091	-0.060	
1	1	0	1.62870	1.62853	0.00017	50.014	50.020	-0.006	
2	0	0	1.41043	1.41045	-0.00002	58.438	58.437	0.001	
1	1	2	1.38185	1.38239	-0.00054	59.768	59.742	0.026	
2	0	1	1.36172	1.36180	-0.00008	60.744	60.740	0.004	

รูปที่ 5.16 แสดงผลจากการคำนวณหาโครงสร้างของสารตัวอย่าง ZnO ด้วยโปรแกรม DICVOL06

ผลจากการคำนวณเพื่อหาโครงสร้างเบื้องต้นด้วย DICVOL06 พบว่ามีค่าที่คำนวณได้ต่างจากค่าที่คำนวณจากการพิศมการที่มากที่สุด คือ 0.060 องศา และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.00109 ซึ่งถือว่าวิธีการปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลต เพื่อนำไปใช้ในการทดลองสำหรับการศึกษาโครงสร้างของสารที่เป็นผลึกผงด้วยวิธีการ เทียบมาตรฐานโดยใช้กริด สามารถแยกแยะโครงสร้างของสารตัวอย่างใดๆ ในระบบบราวส์แลตทิซ ว่าเป็นระบบใดได้

เมื่อทราบโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่าง ZnO ก็มาถึงขั้นตอนสุดท้าย คือการหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ ของสารตัวอย่าง ZnO ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้โปรแกรม Unitcell เพื่อหาค่าคงที่แลตทิซของสารตัวอย่าง ZnO โดยวิธีการคำนวณของโปรแกรมหดงกล่าว ได้กล่าวถึงไว้แล้วในบทที่ 4 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม Unitcell เพื่อใช้ในการศึกษาหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ นั้น ประกอบไปด้วยค่าดัชนีระบุนระนาบผลึกและค่ามุมที่สอดคล้องกับดัชนีระบุนระนาบผลึก ดังแสดงในรูปที่ 5.16 และผลการจากคำนวณด้วยโปรแกรม Unitcell ได้แสดงในรูปที่ 5.17

ZnO powder diffraction			
1	0	0	28.287
0	0	2	30.574
1	0	1	32.161
1	1	0	49.999
1	0	3	55.424
2	0	0	58.418
1	1	2	59.756
2	0	1	60.739
0	0	0	

รูปที่ 5.17 แสดงข้อมูลที่ใช้สำหรับการหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ สำหรับโปรแกรม Unitcell

parameter	value	sigma	95% conf						
a	3.2581	0.0008	0.0019						
c	5.2202	0.0026	0.0064						
cell vol	47.9895	0.0277	0.0677						
no	h	k	l	d(obs)	d(calc)	res(d)	2T.obs	2T.calc	res(2T)
1	1	0	0	2.81766	2.82160	-0.00393	28.287	28.247	0.040
2	0	0	2	2.61138	2.61010	0.00128	30.574	30.589	-0.015
3	1	0	1	2.48567	2.48220	0.00347	32.161	32.207	-0.046
4	1	1	0	1.62916	1.62905	0.00011	49.999	50.003	-0.004
5	1	0	3	1.48056	1.48107	-0.00052	55.424	55.403	0.021
6	2	0	0	1.41087	1.41080	0.00007	58.418	58.421	-0.003
7	1	1	2	1.38210	1.38197	0.00013	59.756	59.762	-0.006
8	2	0	1	1.36182	1.36194	-0.00012	60.739	60.733	0.006

รูปที่ 5.18 แสดงผลจากการคำนวณค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ ของสารตัวอย่าง ZnO ด้วยโปรแกรม Unitcell

จากผลการคำนวณเพื่อหาค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ สำหรับสารตัวอย่าง ZnO ในงานวิจัย
 ชีวนี้ พบว่าได้ค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ $a = 3.2581(8) \text{ \AA}$ $b = 3.2581(8) \text{ \AA}$ และ $c = 5.220(3) \text{ \AA}$
 และมีค่าความคลาดเคลื่อนของมุม 2θ ที่มากที่สุดเท่ากับ 0.046 องศา ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ
 งานวิจัยของ Kisi E.H. และ Kihara K, Donnay G [21,22] พบว่ามีค่าความแตกต่างดังนี้ $\Delta a =$
 $\Delta b = 0.0080(8) \text{ \AA}$ และ $\Delta c = 0.014(3) \text{ \AA}$ ซึ่งถือว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก จึงสามารถทำให้สรุป
 ได้ว่า วิธีการปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลต โดยใช้วิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด สำหรับทำการ
 ทดลอง ด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อหาโครงสร้างของผลึกผงภายใต้ความดัน
 บรรยากาศ สามารถหารูปแบบของเซลล์หนึ่งหน่วยและค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ ของผลึกผงได้ โดย
 มีค่าความคลาดเคลื่อนของค่ามุม 2θ ที่มากที่สุดเท่ากับ 0.046 องศา และสามารถวิเคราะห์ยอด
 ของการเลี้ยวเบนที่มุมของแบรกก์ที่สูงสุด ประมาณ 61 องศา ซึ่งเป็นมุมที่ได้จากค่าสูงที่สุดที่
 สามารถใช้ข้อมูลจากสารมาตรฐาน Al_2O_3 แปลงผันข้อมูลจากค่าระยะทาง มาเป็น ค่ามุม 2θ ได้
 สำหรับการทดลองที่ต้องการใช้ค่ามุมที่สูงขึ้นในการวิเคราะห์โครงสร้างของสารตัวอย่าง จึงจำเป็น
 ที่จะต้องใช้สารตัวอย่างที่มีจำนวนยอดมากขึ้นและใช้อิมเมจเพลตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

บทที่ 6

สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

การปรับแต่งอิมเมจเพลด เพื่อนำไปใช้เป็นตัวตรวจจับในการทดลองโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ชนิดระเจิงมุม สำหรับศึกษาโครงสร้างของสารตัวอย่าง ZnO ภายใต้ความดันบรรยากาศ และการนำสารมาตรฐาน Al_2O_3 มาใช้เพื่อทำการแปลงข้อมูลค่าความเข้ม กับ ระยะทาง ให้เป็นค่าความเข้ม กับ มุม 2θ สำหรับนำไปใช้ในการหาโครงสร้างและค่าคงที่แลตทิซของ ZnO โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้รังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ค่าความยาวคลื่น 1.377 \AA สามารถแยกสรุปผลและวิจารณ์ผลการวิจัยได้ดังนี้

6.1 วิธีการปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลดโดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด

การปรับแต่งเครื่องอ่านอิมเมจเพลดโดยวิธีการเทียบมาตรฐานโดยใช้กริด สำหรับแก้ไขค่าตำแหน่งที่อ่านได้จากเครื่องอ่านอิมเมจเพลด ให้เป็นค่าที่เป็นจริงพบว่ามีตำแหน่งบนอิมเมจเพลด 371 ตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าตำแหน่งจริง ซึ่งคิดเป็น 1.08 % ของตำแหน่งทั้งหมดบนอิมเมจเพลด ดังนั้นอิมเมจเพลดที่นำมาใช้เพื่อเป็นตัวตรวจจับ จึงสามารถเก็บข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากสารตัวอย่างแล้วระบุตำแหน่งได้อย่างถูกต้องไม่เกิน 1 pixel ได้ถึง 99.08 % ของพื้นที่อิมเมจเพลดทั้งหมด ซึ่งทำให้ข้อมูลที่ได้อ่านมีความถูกต้องและความแม่นยำค่อนข้างสูง

6.2 สารตัวอย่าง ZnO

ข้อมูลของ ZnO บนอิมเมจเพลดที่ได้จากการทดลองเป็นค่าความเข้ม กับ ระยะทางจากจุดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบไปยังยอดของการเลี้ยวเบน ซึ่งจำเป็นต้องมีการแปลงข้อมูลโดยใช้ สาร Al_2O_3 ซึ่งทราบข้อมูลของระนาบที่เกิดการเลี้ยวเบนแล้วจากงานวิจัยของ Cooper M.J. และ Huang และคณะ [17, 18] ซึ่งได้ทำการทดลองไว้ เพื่อหาสมการสำหรับการแปลงข้อมูลจากระยะทาง ไปเป็นมุม 2θ โดยค่าผลต่างที่มากที่สุดระหว่างผลจากการทดลองและค่าที่ทำการคำนวณจากสมการการแปลงดังกล่าว อยู่ที่ $0.0132(6)$ องศา ซึ่งโดยปกติค่าผลต่างของการทดลองที่มีการแยกชัดที่ดีมีค่า

0.01 องศา ซึ่งหมายความว่า การแปลงข้อมูลจากค่าระยะทาง ไปเป็น ค่ามุม 2θ ในงานวิจัยชิ้นนี้ ทำได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับการทดลองที่มีการแยกชุดที่ดี เมื่อทำการแปลงข้อมูลของสาร ZnO แล้วนำไปศึกษาเพื่อหาโครงสร้างและค่าคงที่แลตทิซ พบว่า ZnO มีโครงสร้างเป็นแบบ Hexagonal และมีผลการคำนวณค่าผลต่างของการทดลองจากทฤษฎี ดังตารางที่ 6.1

ดัชนีระนาบ (h k l)	$d_{\text{obs}} (\text{Å})$	$d_{\text{cal}} (\text{Å})$	$\Delta d (\text{Å})$	$2\theta_{\text{obs}} (\text{deg})$	$2\theta_{\text{cal}} (\text{deg})$	$\Delta 2\theta (\text{deg})$
1 0 0	2.81766	2.82160	-0.00393	28.287	28.247	0.040
0 0 2	2.61138	2.61010	0.00128	30.574	30.589	-0.015
1 0 1	2.4567	2.48220	0.00347	32.161	32.207	-0.046
1 1 0	1.62916	1.62905	0.00011	49.999	50.003	-0.004
1 0 3	1.48056	1.48107	-0.00052	55.424	55.403	0.021
2 0 0	1.41087	1.41080	0.00007	58.418	58.421	-0.003
1 1 2	1.38210	1.38197	0.00013	59.756	59.762	-0.006
2 0 1	1.36182	1.36194	-0.00012	60.739	60.733	0.006

ตารางที่ 6.1 แสดงผลต่างระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ ZnO และจากการคำนวณตามทฤษฎี

จากตาราง 6.1 ค่าผลต่างของมุม 2θ ระหว่างการทดลองกับการคำนวณ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.003-0.046 องศา ซึ่งพบว่ามี ความคลาดเคลื่อนไปน้อยมาก และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหา ค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ ได้ $a = b = 3.2581(8) \text{ \AA}$ และ $c = 5.220(3) \text{ \AA}$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ ผลการทดลองของ Kisi E.H. และ Kihara K, Donnay G[21,22] พบว่ามีความแตกต่าง $\Delta a = \Delta b = 0.0081(8) \text{ \AA}$ และ $\Delta c = 0.014(3) \text{ \AA}$ ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าค่าความ แตกต่างมีค่าน้อยมาก ทั้งนี้ยังมีปัจจัยบางประการที่ยังไม่ได้นำมาพิจารณา อาทิเช่น ค่าความกว้าง ที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของค่ามากที่สุด หรือค่าความกว้างของยอดซึ่งเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ที่ตก กระทบสารตัวอย่างมีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่แสงซินโครตรอนมีค่าความเข้มค่อนข้าง ต่ำ จึงเกิดปัญหาในการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับลดขนาดของลำรังสีที่ตกกระทบกับสารตัวอย่าง จึง ทำให้ค่าความกว้างที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของค่ามากที่สุดมีค่าสูง ส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนจาก ผลการทดลองทั้งรูปร่างและตำแหน่งของยอด อย่างไรก็ตามผลจากการปรับแต่งอิมเมจเพลต โดย วิธีการกริด แคลิเบรชันเพื่อเป็นตัวตรวจจับในการทดลองด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถนำไปใช้ในการทดลองเพื่อหาโครงสร้างและค่าคงที่แลตทิซของสารตัวอย่าง ZnO ได้โดย สามารถวิเคราะห์ค่ามุม 2θ ที่มีค่าสูงสุดประมาณ 61 องศาในกรณีที่ต้องการค่ามุมสำหรับการ วิเคราะห์ที่สูงขึ้น จำเป็นต้องใช้อิมเมจเพลตที่มีขนาดใหญ่กว่าในงานวิจัยนี้ และใช้สารมาตรฐานที่มี จำนวนยอดมากขึ้น การปรับแต่งอิมเมจเพลตในงานวิจัยชิ้นนี้สามารถพัฒนานำไปใช้เป็นตัว ตรวจจับสำหรับหาโครงสร้างของสารตัวอย่างภายใต้ความดันสูงได้

รายการอ้างอิง

- [1] B.D. Cullity and S.R. Stock. Elements of X-Rays Diffraction. 3rd ed. New Jersey :
Prentice, 2001.
- [2] V. Saengsuwan. CRYSTAL STRUCTURE OF CuInSe₂ UNDER HIGH PRESSURE. M.Sc. Thesis,
Department of Physics, Chulalongkorn University, (2004).
- [3] C. HAMMOND. The Basics of Crystallography and Diffraction. 2nd ed. Oxford :
Oxford, 2001.
- [4] Charles Kittel, Introduction to Solid State Physics, 7th ed. United States
of America: John Wiley & Sons, 1996.
- [5] Michael V. Martinez. A Basic Understanding of Scanning Electron Microscopy (SEM)
[online]. Available from: <http://www.forensicevidence.net/iama/sem-edxtheory.html>
[2008, June 21]
- [6] X-ray Fluorescence Spectroscopy[online]. Available from :
http://www.tint.or.th/adv/phys_oap/xrf02.html[2008 Dec 20]
- [7] Synchrotron Radiation Source[online]. Available from : <http://www.slri.or.th>[2008 Dec 25]

- [8] M. Sonoda , M. Takano, J. Miyahara and H. Kato. Computed radiography utilizing scanning laser stimulated luminescence. Radiology, 833 (1983): 148.
- [9] Image Plate. Available from :

http://www.fujifilm.com/products/life_science/si_imgplate/whatis03.html[2008 Dec 20]
- [10] M. Hoben, R. Schmechel, R. W. Henn and H. Seggern ; SPIE, 280 (1999): 3768.
- [11] Shigeru Munekawa and Joseph D. Ferrara. Imaging Plates as Detectors for X-ray Diffraction[online]. Available from: <http://www.rigakumsc.com>[2008 ,June 23]
- [12] Scott A.Belmonte. 2-D Data Analysis in High-Pressure Powder Diffraction . Ph.D. Thesis, Department of Physics and Astronomy, The University of Edinburgh, (1998).
- [13] Margaritondo G. Introduction to synchrotron radiation . New York :Oxford University Press, 1988.
- [14] UMR Series Precision Double-Row Ball Bearing Linear Stages[online]. Available from :

<http://www.newport.com>[2008 Dec 25]
- [15] Desgreniers S. and K. Lagarec. XRDA: a program for energy-dispersive X-ray diffraction analysis on a PC. Journal of Applied Crystallography 31(1998): 109.
- [16] T. J. B. Holland and S. A. T. Redfern. Unit cell refinement from powder diffraction data: the use of regression diagnostics. Mineralogical Magazine 61(1997): 65-77.

- [17] Cooper M. J. The Analysis of Powder Diffraction Data. Acta Crystallographica B.
38 (1982): 264-269.
- [18] Huang, T et al. Synchrotron X-ray study of the electron density in α -Al₂O₃.
Advance X-Ray Analysis 33(1990): 295.
- [19] Desgreniers S. and K. Lagarec. XRDA: a program for energy-dispersive X-ray
diffraction analysis on a PC. Journal of Applied Crystallography 27(1994): 432.
- [20]. Desgreniers S. and K. Lagarec. High Density Phases of ZnO: Structural and
Compressive Parameters. Journal of Applied Crystallography 21(1998): 454.
- [21] Kisi E H, Elcombe . U Parameters for the Wurtzite structure of ZnS and ZnO using
powderneutron diffraction. Acta Crystallographica C (1989): 1867-1870.
- [22] Kihara K, Donnay G . Anharmonic thermal vibrations in ZnO. The Canadian Mineralogist
23 (1985): 647-654.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

แสดงระยะทางระหว่างระนาบตาม Crystal class ที่ 7

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

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

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

Hexagonal
$$d_{hkl} = \sqrt{\frac{1}{\frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}}}$$

Monoclinic
$$d_{hkl} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{ac} \right)}}$$

Trigonal
$$d_{hkl} = \sqrt{\frac{a^2(1 - 3\cos^2 \alpha + 2\cos^3 \alpha)}{(h^2 + k^2 + l^2)\sin^2 \alpha + 2(hk + kl + hl)(\cos^2 \alpha - \cos \alpha)}}$$

Triclinic
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{\frac{h^2}{a^2} \sin^2 \alpha + \frac{k^2}{b^2} \sin^2 \beta + \frac{l^2}{c^2} \sin^2 \gamma + \frac{2hk}{ab} (\cos \alpha \cos \beta - \cos \gamma)}{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma} + \frac{\frac{2kl}{bc} (\cos \beta \cos \gamma - \cos \alpha) + \frac{2lh}{ca} (\cos \gamma \cos \alpha - \cos \beta)}{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัฐ มโนธัม เกิดเมื่อวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ. 2526 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ศึกษาศาสตร์) (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี เมื่อปี 2548 ได้เข้าศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย