

บทที่ 4

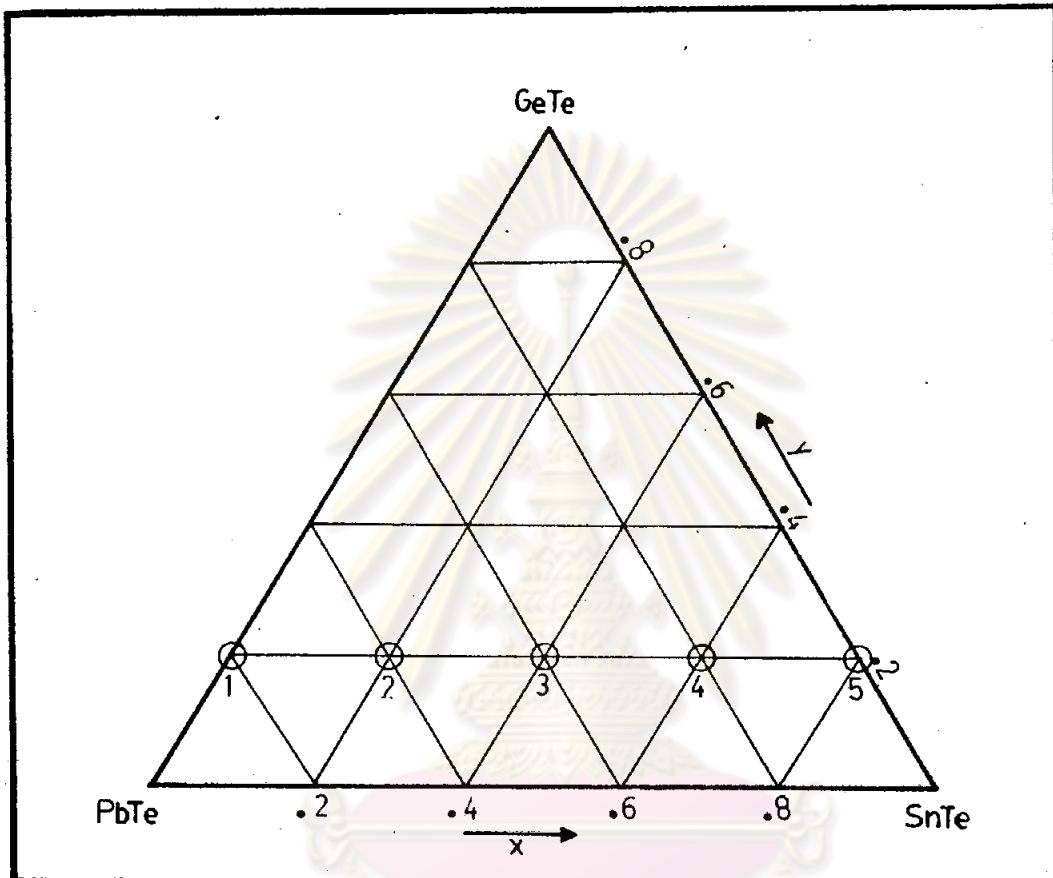
การเตรียมโลหะผสมและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมโลหะผสมโดยเริ่มตั้งแต่การนำธาตุหรือโลหะแต่ละชนิดมาชั่ง, ผสมและเผา, การหาหน่วยเซลล์จากภาพถ่ายผลึกผง, การเลือกผลึกเดี่ยวและติดตั้งผลึกเดี่ยว, ข้อมูลการศึกษาผลึกเดี่ยว เช่น การปรับแกนผลึก, การถ่ายภาพแบบออสซิลเลชัน, การถ่ายภาพแบบไวซ์เชนเบอร์ก และ การวัดความเข้มของจุดสะท้อนต่าง ๆ บนฟิล์มเป็นต้น การศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง โดยใช้เครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์, การวัดความเข้มโดยเครื่องอินทิเกรเตอร์แพกเกจ และการวัดความเข้มโดยการนับพื้นที่ใต้เส้นโค้งของดิฟแฟรกโตแกรม

4.1 การเตรียมโลหะผสม $Pb_{1-x-y}Sn_xGe_yTe$ (วิธีที่ ส่ายคณิต และคณะ, 2523)

การเตรียมโลหะผสมที่ต้องการศึกษาใช้วิธีการหลอมผสมกันโดยคิดตามเปอร์เซ็นต์โมล (mole percent) ของ $GeTe$, $SnTe$ และ $PbTe$ ดังรูปที่ 4.1 สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมโลหะผสม 1 แก้ว ที่ $y = 0.2$ ส่วน $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6$ และ $= 0.8$ ธาตุ Pb, Sn, Ge และ Te ที่ใช้ในการเตรียมมีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.99% ในการวิจัยนี้เราต้องการ ศึกษาเฉพาะโครงสร้างผลึกเท่านั้น ดังนั้นความบริสุทธิ์เพียง 99.99% ก็เพียงพอแล้ว

สำหรับธาตุที่ใช้เตรียมนี้เราต้องทราบข้อมูลต่าง ๆ เช่น น้ำหนักอะตอมของธาตุ, สัมประสิทธิ์ของธาตุเป็นต้น ดังตารางที่ 4.1 (International Table vol.III, 1962)



รูปที่ 4.1 แสดงเปอร์เซ็นต์โมลของโลหะผสมที่ต้องการเตรียมหมายเลข 1 ถึง 5

ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 แสดงน้ำหนักอะตอม, จุดหลอมเหลว, ลักษณะธาตุ และความบริสุทธิ์

ธาตุ	น้ำหนักอะตอม	จุดหลอมเหลว (°C)	ลักษณะของธาตุ	ความบริสุทธิ์(%)
Pb	207.21	327.3	แผ่นสีเทาดำ, อ่อน	99.99
Sn	118.70	231.9	ก้อน, วาว, อ่อน	99.99
Ge	72.60	958	เกล็ด, วาว, แข็ง	99.999
Te	127.61	450	แท่ง, แข็งเปราะ	99.99

4.1.1 การคำนวณน้ำหนักของธาตุ

ในงานวิจัยนี้ต้องการเตรียมโลหะผสม $\text{Pb}_{0.8} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$, $\text{Pb}_{0.6} \text{Sn}_{0.2} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$, $\text{Pb}_{0.4} \text{Sn}_{0.4} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$, $\text{Pb}_{0.2} \text{Sn}_{0.6} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$ และ $\text{Sn}_{0.8} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$ รวม 5 สสาร โดยแต่ละสสารหนักเท่ากับ 0.5 กรัม ตัวอย่างของการคำนวณ $\text{Pb}_{0.8} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$ ซึ่งมีน้ำหนักอะตอมรวม = $(0.8 \times 207.21) + (0.2 \times 72.6) + (1 \times 127.61)$
 $= 307.898$ น้ำหนักอะตอมรวมได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าน้ำหนักอะตอมรวม 307.898 กรัม มี Ge คิดเป็นน้ำหนัก 14.52 กรัม ดังนั้นถ้าเราต้องการโลหะผสมหนัก 0.5 กรัม จะใช้ Ge เป็น $\frac{14.52 \times 0.5}{307.898} = 0.0236$ กรัม ทำนองเดียวกันสำหรับ Pb และ Te ได้ $\text{Pb} = 0.2692$ กรัม, $\text{Te} = 0.2072$ กรัม เมื่อนำน้ำหนักของ Pb, Ge และ Te ที่คำนวณแล้วมารวมกัน $= 0.0236 + 0.2692 + 0.2072 = 0.5$ กรัม ได้แสดงน้ำหนักของธาตุแต่ละตัวที่คำนวณได้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 แสดงการคำนวณน้ำหนักอะตอมรวม

โลหะผสมที่เตรียม	น้ำหนักอะตอมรวม
$Pb_{0.8} Ge_{0.2} Te$	$(0.8 \times 207.21) + (0.2 \times 72.6) + (1 \times 127.61)$ = 307.898
$Pb_{0.6} Sn_{0.2} Ge_{0.2} Te$	$(0.6 \times 207.21) + (0.2 \times 118.7) + (0.2 \times 72.6) + (1 \times 127.61)$ = 290.196
$Pb_{0.4} Sn_{0.4} Ge_{0.2} Te$	$(0.4 \times 207.21) + (0.4 \times 118.7) + (0.2 \times 72.6) + (1 \times 127.61)$ = 272.494
$Pb_{0.2} Sn_{0.6} Ge_{0.2} Te$	$(0.2 \times 207.21) + (0.6 \times 118.7) + (0.2 \times 72.6) + (1 \times 127.61)$ = 254.792
$Sn_{0.8} Ge_{0.2} Te$	$(0.8 \times 118.7) + (0.2 \times 72.6) + (1 \times 127.61)$ = 237.09

ตารางที่ 4.3 แสดงน้ำหนักธาตุที่คำนวณได้เพื่อใช้ในการเตรียมโลหะผสมหนัก 0.5 กรัม

โลหะผสมที่เตรียม	Pb (กรัม)	Sn (กรัม)	Ge (กรัม)	Te (กรัม)	น้ำหนักรวม(กรัม)
$Pb_{0.8} Ge_{0.2} Te$	0.2692	-	0.0236	0.2072	0.5
$Pb_{0.6} Sn_{0.2} Ge_{0.2} Te$	0.2142	0.0409	0.0250	0.2199	0.5
$Pb_{0.4} Sn_{0.4} Ge_{0.2} Te$	0.1521	0.0871	0.0266	0.2342	0.5
$Pb_{0.2} Sn_{0.6} Ge_{0.2} Te$	0.0813	0.1398	0.0285	0.2504	0.5
$Sn_{0.8} Ge_{0.2} Te$	-	0.2003	0.0306	0.2691	0.5

4.1.2 การชั่งน้ำหนักของธาตุ

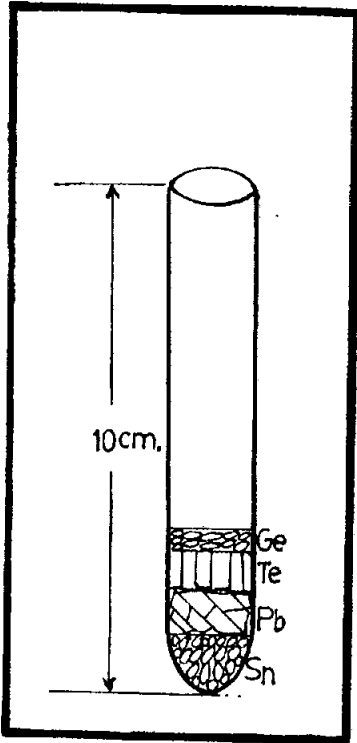
ก่อนที่จะชั่งน้ำหนักธาตุต่าง ๆ ต้องเตรียมหลอดแก้วควอทซ์ (quartz tube) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4.5 มิลลิเมตรปลายปิดข้างหนึ่งยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ทำความสะอาดและแห้งแล้ว เมื่อชั่งน้ำหนักธาตุได้ตามต้องการแล้วก็บรรจุลงในหลอดแก้วนี้ตามลำดับ โดยให้ธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำสุดอยู่ล่างสุดและจุดหลอมเหลวสูงที่สุดอยู่บนสุดดังรูปที่ 4.2 เพราะต้องใช้เปลวไฟที่มีความร้อนสูงมากทำคอคอด ดังรูปที่ 4.3 ก. ถ้าให้ธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำอยู่บนอาจทำให้ธาตุนั้นเกิดการหลอมละลายทำให้เกิดออกไซด์ (oxide) ขึ้นในหลอดได้ ความละเอียดของเครื่องชั่งเท่ากับ 0.1 มิลลิกรัม ซึ่งเพียงพอสำหรับความแม่นยำของส่วนผสมของโลหะผสมที่ต้องการ

4.1.3 การทำหลอดบรรจุธาตุเป็นหลอดสูญญากาศ

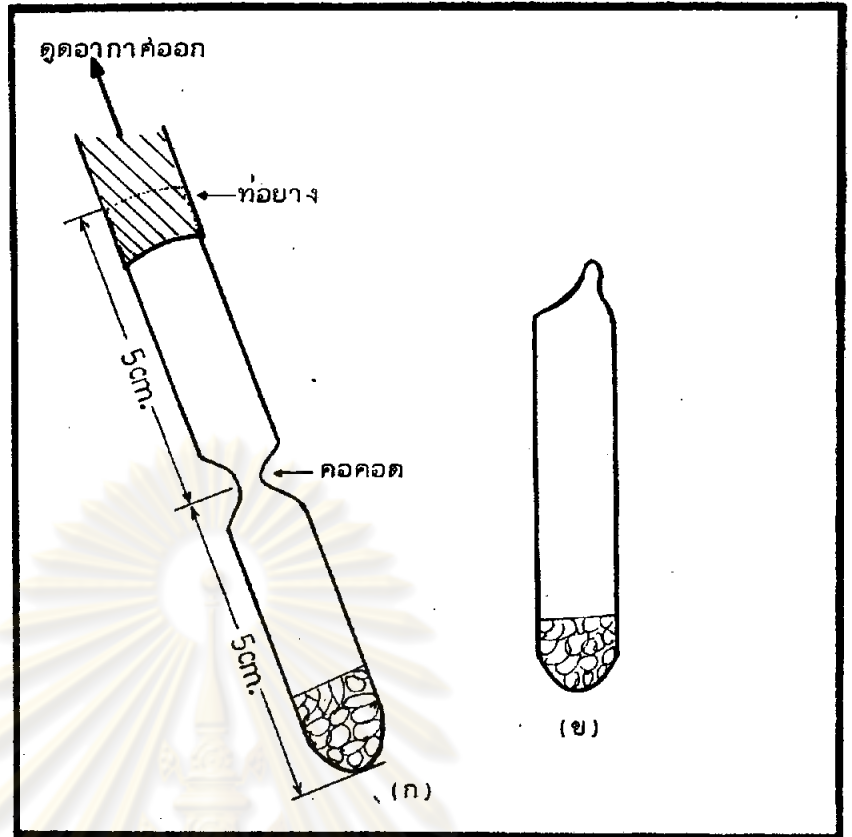
นำหลอดแก้วที่บรรจุธาตุครบแล้วไปทำคอคอดดังรูปที่ 4.3 ก. โดยใช้เปลวไฟอาเซทิลีนผสมกับออกซิเจนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส จากนั้นส่งเข้าไปดูดอากาศออกการดูดอากาศออกตอนแรกดูดด้วยเครื่องดูดอากาศแบบโรตารี (rotary vacuum pump) ก่อน จนความดันอากาศภายในต่ำกว่า 10^{-2} ทอร์ (1 ทอร์ = 133.322 นิวตันต่อตารางเมตร) แล้วจึงดูดอากาศออกด้วยเครื่องดูดอากาศแบบดิฟฟิวชัน (diffusion pump) ซึ่งต่ออยู่ด้วยกัน จนความดันอากาศภายในเหลือประมาณ 2.5×10^{-6} ทอร์ จึงปิดหลอดโดยใช้เปลวไฟค้อย ๆ หลอมบริเวณคอคอดจนกระทั่งหลอดหลอมติดกัน จะได้หลอดสูญญากาศบรรจุธาตุดังรูปที่ 4.3 ข

4.1.4 การหลอมโลหะผสม

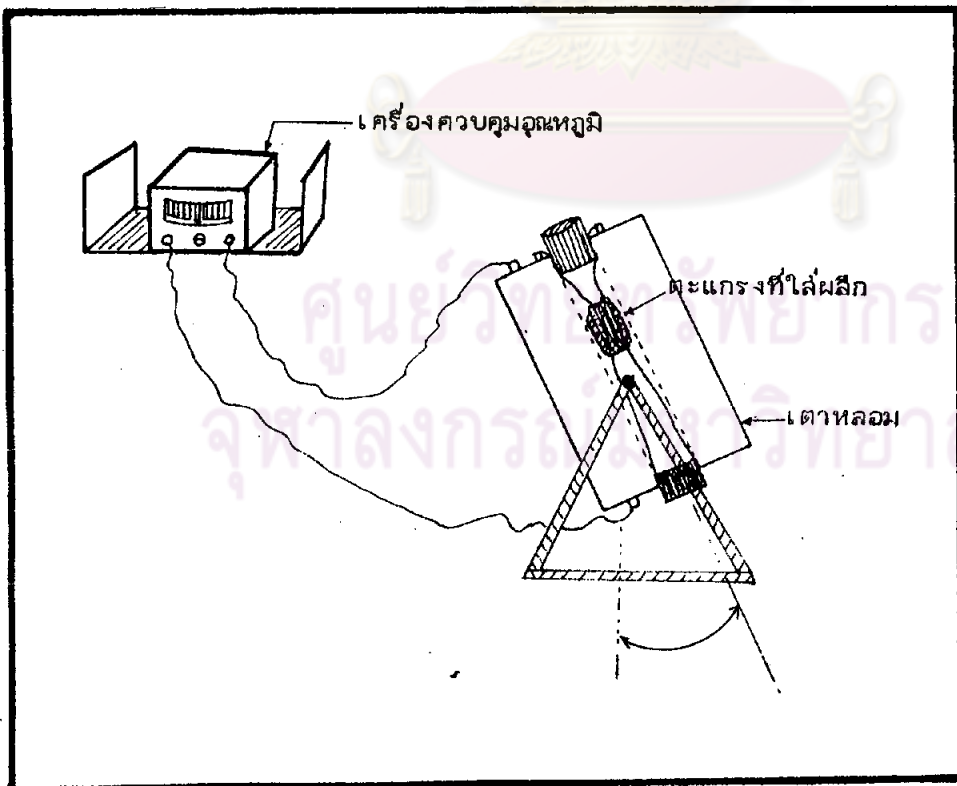
นำหลอดสูญญากาศบรรจุธาตุแล้วทั้ง 5 หลอดเข้าเตาหลอมโดยบรรจุในตะแกรงลวดทนความร้อนผูกยึดติดกับเตาหลอมที่ปลายทั้งสองของเตาโดยเตาหลอมนี้สามารถหมุนได้เป็นมุมมากกว่า 180° ดังรูปที่ 4.4 เพื่อใช้หมุนกลับหัวขณะที่โลหะกำลังหลอมทำให้สามารถหลอมรวมตัวกันได้ง่าย อุณหภูมิที่ใช้หลอมประมาณ 1,000 องศาเซลเซียสใช้เวลาหลอมนาน 24 ชั่วโมง จึงลดอุณหภูมิลงมาช้า ๆ จนอุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส จึงปิดเตาปล่อยให้เย็น



รูปที่ 4.2 แสดงการบรรจุธาตุในหลอด



รูปที่ 4.3 แสดงการปิดหลอดและหลอดแก้วที่ปิดเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.4 แสดงเตาหลอมโลหะผสมที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

4.1.5 การแอนนัลและการตรวจสอบสภาพโลหะผสม

หลอดแก้วที่บรรจุโลหะผสมที่หลอมละลายแล้วนำไปแอนนัลต่อในเตาที่อุณหภูมิคงที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 8 สัปดาห์ และทิ้งให้เย็นในเตา นำหลอดที่เป็นแล้วไปชุบให้แตกจากนั้นนำโลหะผสมที่ได้ไปบดและถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ด้วยกล้องกีเฟอร์-เฮกกี ชนิดปรับโฟกัส (Guinier - Hägg focusing camera, X-DC 700) ใช้รังสีเอ็กซ์เป้าหมายแดงชนิด $K\alpha_1$ ($\lambda_{Cu K\alpha_1} = 1.5406 \text{ \AA}$) เพื่อทำการตรวจสอบว่าโลหะผสมที่ได้มีลักษณะผสมตุล และเฟสเดียว (single-phase) หรือไม่โดยพิจารณาจากเส้นที่ปรากฏบนฟิล์ม การแอนนัลต้องกระทำต่อไปจนกระทั่งได้โลหะอยู่ในสภาวะผสมตุล เฟสเดียวและเป็นส่วนผสมเนื้อเดียวกัน (homogeneous) โดยอุณหภูมิที่ใช้แอนนัลต่ำกว่าจุดหลอมเหลวประมาณ 50 องศาเซลเซียส

4.2 การถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงเพื่อหาขนาดหน่วยเซลล์

โลหะผสมที่ตรวจสอบพบว่าได้ลักษณะผสมตุล เฟสเดียวแล้วนำมาหาหน่วยเซลล์อย่างละเอียดโดยการนำโลหะผสมนี้ไปบดทำผงตัวอย่าง (powder specimen) และถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ใช้กล้องกีเฟอร์-เฮกกี รังสีเอ็กซ์เป้าหมายแดงชนิด $K\alpha_1$ ในการทดลองใช้ซิลิกอนบริสุทธิ์ 99.9% ($a = 5.43088 \text{ \AA}$) เป็นตัวเทียบมาตรฐานใช้เวลาในการออปรังสีเอ็กซ์ประมาณ 2 ชั่วโมง ฟิล์มที่ได้จากภาพถ่ายผลึกผงแสดงดังรูปที่ 4.5 ก. ข.ค.ง. และ จ.

4.3 การเลือกผลึกเดี่ยวและติดผลึกบนหัวโกนไดโอมิเตอร์

จากโลหะผสมทั้ง 5 ชนิด โลหะผสม $Pb_{0.8} Ge_{0.2} Te$ และ $Sn_{0.8} Ge_{0.2} Te$ เป็นโลหะผสมที่ผู้ศึกษากันมาแล้ว ดังนั้นในการเลือกผลึกเดี่ยวจึงได้เลือกจากโลหะผสม $Pb_{0.2} Sn_{0.6} Ge_{0.2} Te$, $Pb_{0.4} Sn_{0.4} Ge_{0.2} Te$ และ $Pb_{0.6} Sn_{0.2} Ge_{0.2} Te$ โดยทำการเลือกทีละชนิดในการพิจารณาว่า เป็นผลึกเดี่ยวหรือไม่นั้นใช้การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์โดยวิธีถ่ายภาพแบบออสซิลเลชัน (oscillation) มุมแคบซึ่งหมุนกลับไปมาในช่วง 15 องศา



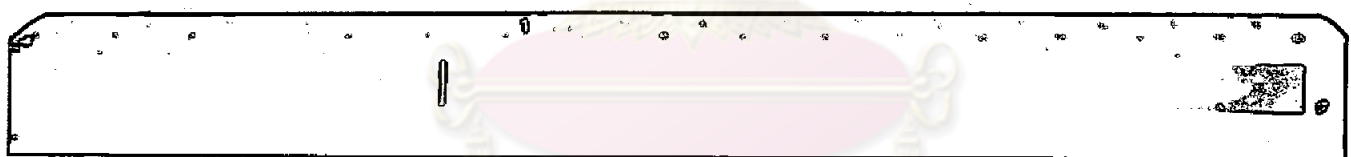
(ก)



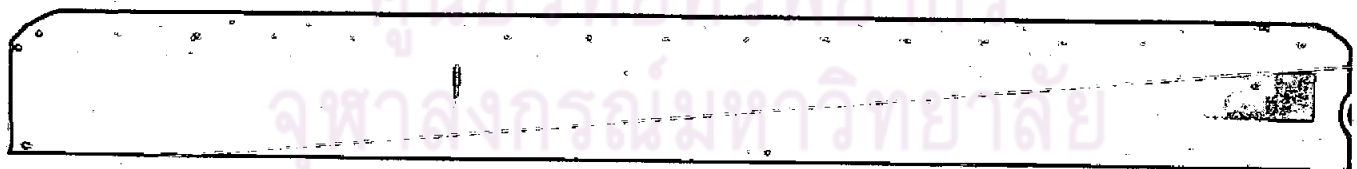
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายผลึกผงของกล้อง Guinier-Hägg ของโลหะผสม

(ก) $\text{Pb}_{0.8} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$,

(ข) $\text{Pb}_{0.6} \text{Sn}_{0.2} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$,

(ค) $\text{Pb}_{0.4} \text{Sn}_{0.4} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$

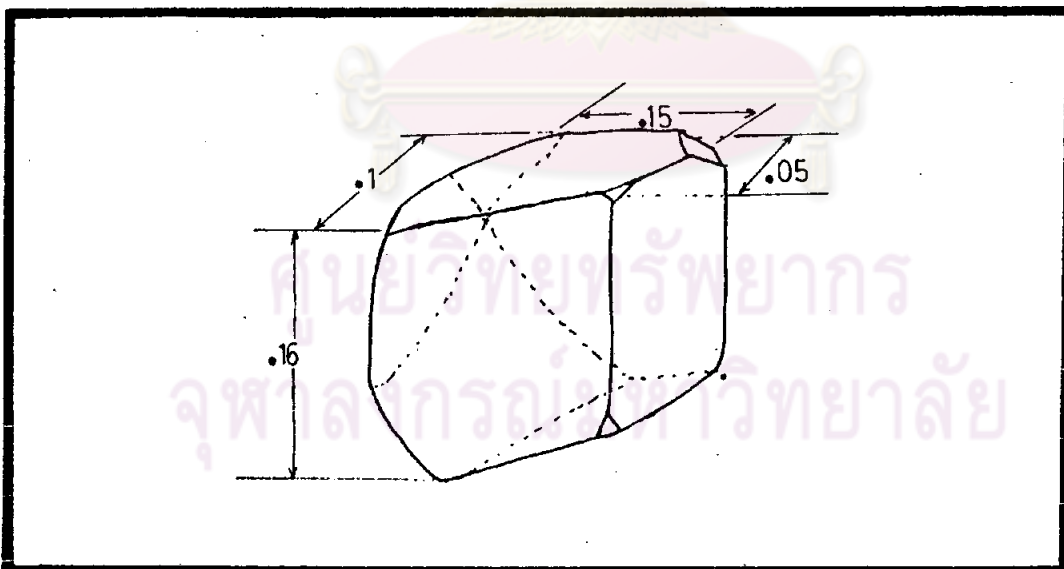
(ง) $\text{Pb}_{0.2} \text{Sn}_{0.6} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$,

และ (จ) $\text{Sn}_{0.8} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$

ใช้เวลาประมาณภาพละ 30 นาที แล้วนำฟิล์มมาพิจารณาจุดสะท้อนที่ปรากฏบนฟิล์ม โลหะผสม ส่วนใหญ่ที่เตรียมได้มักอยู่ในรูปของผลึกผง (polycrystalline) หรือยังไม่เป็นผลึกเดี่ยว ที่แท้จริง จากภาพถ่ายแบบออสซิลเลชันอาจได้จุดคู่หรือแกนผลึกคู่ที่เราเรียกว่า ผลึกแฝด (twin crystal) ซึ่งพอจะพิจารณาได้

4.3.1 การเลือกผลึกเดี่ยว $Pb_{0.6} Sn_{0.2} Ge_{0.2} Te$

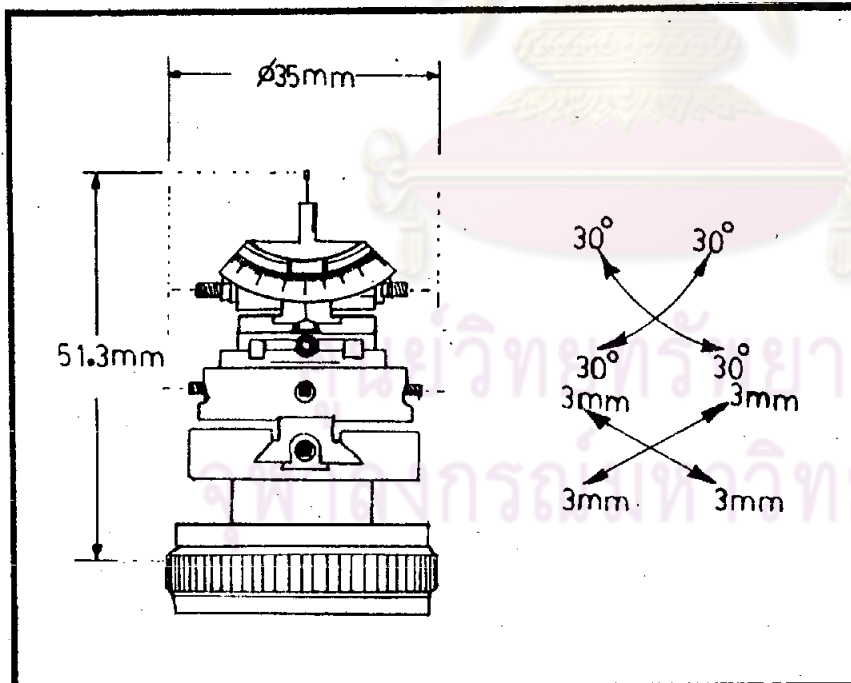
โดยการนำแท่ง โลหะผสมมาทุบบางส่วนให้ละเอียดพอควรแล้วทำการเลือกผลึกเดี่ยวหรืออาจเลือกจากชิ้นผลึกที่หลุดออกมาจากแท่งโลหะผสม โดยดูจากลักษณะภายนอกของผลึกใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดขยาย 20 เท่า ในการเลือกโลหะผสม $Pb_{0.2} Sn_{0.6} Ge_{0.2} Te$ และ $Pb_{0.4} Sn_{0.4} Ge_{0.2} Te$ พบว่าเลือกผลึกเดี่ยวได้ยาก ส่วนโลหะผสม $Pb_{0.6} Sn_{0.2} Ge_{0.2} Te$ พบว่ามีผลึกบางตัวที่เลือกได้เป็นผลึกเดี่ยว จึงได้เลือกโลหะผสมชนิดนี้ มาศึกษาผลึกเดี่ยว ผลึกที่เลือกได้มีรูปร่างดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงรูปร่างและขนาดของผลึกเดี่ยว (มิลลิเมตร) ที่ใช้ในการทดลอง

4.3.2 การติดตั้งผลึก

การถ่ายภาพของผลึกเดี่ยวแบบต่าง ๆ ผลึกจะต้องหมุนกลับไปมา โดยรอบ ขณะอาบรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นจึงนำผลึกมาติดกับใยแก้วโดยใช้กาวแคนาดาบาลซัม (canada balsam) ความยาวของใยแก้วประมาณ 1.5-2 เซนติเมตร การติดผลึกควรเลือกติดทางด้านแกนขนานกับผลึก ดังรูปที่ 4.7 แสดงผลึกเดี่ยวที่เลือกติดกับปลายใยแก้ว ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งเสียบไว้อยู่บนยอดของหัวโกนโอมิเตอร์ โดยหัวโกนโอมิเตอร์สามารถปรับอาร์ค (arc) ทั้งสองได้เป็นมุม $\pm 30^\circ$ เพื่อใช้จัดแกนผลึกให้ตรงตามต้องการและได้อาร์คสามารถปรับฐานให้เลื่อนได้เป็นระยะ ± 3 มิลลิเมตร เพื่อใช้ปรับความโค้งของผลึกขณะหมุน



รูปที่ 4.7 แสดงผลึกเดี่ยวที่ติดอยู่บนหัวโกนโอมิเตอร์

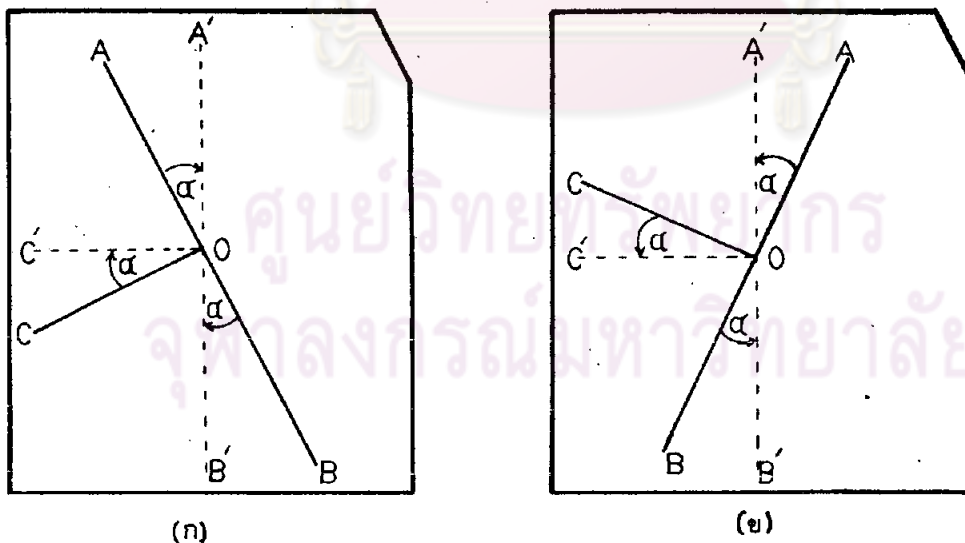


4.4 การถ่ายภาพการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์แบบต่าง ๆ สำหรับผลึกเดี่ยว

ในการถ่ายภาพแบบต่าง ๆ สำหรับผลึกเดี่ยวนั้นก่อนอื่นเราต้องปรับแกนผลึกที่หมุนรอบนั้นให้ตั้งฉากกับลำรังสีเอ็กซ์เสียก่อน

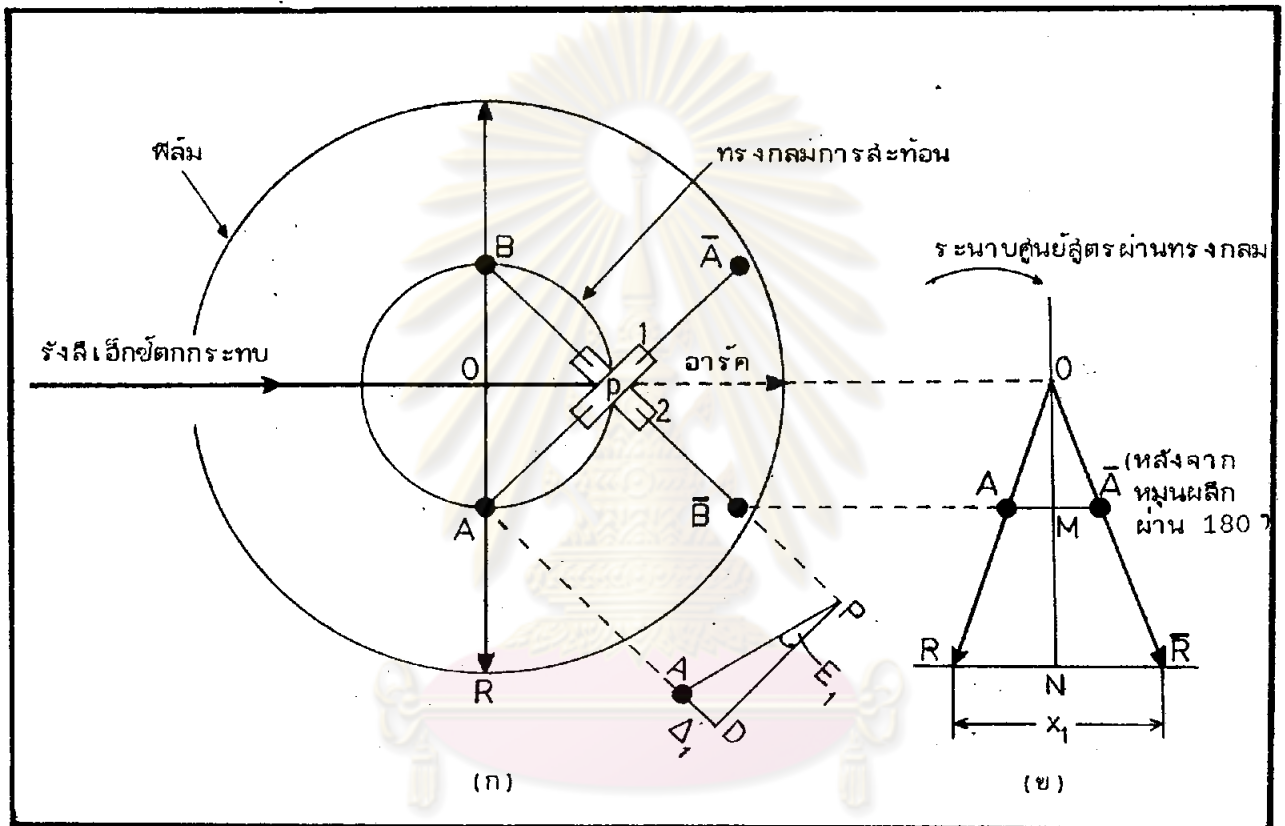
4.4.1 การปรับแกนผลึกให้เป็นแกนหมุน

ขั้นแรกต้องปรับแกนผลึกแบบหยาบ ๆ ก่อน โดยการถ่ายภาพออสซิลเลชันให้ผลึกหมุนด้วยมุมแคบ ± 7.5 องศา ถ่ายภาพแต่ละครั้งให้อาร์คแต่ละอาร์คตั้งฉากกับลำรังสีเอ็กซ์ใช้เวลาถ่ายภาพ 30-40 นาที จากรูปที่ 4.8 สัมมุติภาพถ่ายเมื่อให้อาร์คใหญ่ตั้งฉากกับลำรังสีเอ็กซ์ จุดสะท้อนของเส้นเลี้ยวเออร์ไลน์ที่ศูนย์ ปรากฏตามแนว AB โดยแนว OC เป็นแกนหมุนของผลึก ซึ่งยังไม่ตั้งฉากกับลำรังสีวัดมุมที่ต้องปรับได้ α องศา ดังนั้นต้องปรับอาร์คใหญ่ α องศา ทำให้แกนหมุนของผลึกปิดไป OC' ซึ่งตั้งฉากกับลำรังสี และแนวเส้นเลี้ยวเออร์ก็จะปิดไปเป็นมุม α ด้วย เช่นกันเป็น $A'B'$ ในกรณีรูปที่ 4.8 (ก) ปรับมุมไปทางบวกและรูปที่ 4.8 (ข) ปรับมุมไปทางลบ เมื่อปรับอาร์คใหญ่แล้วต้องปรับอาร์คเล็กในทำนองเดียวกัน ทำล้สลับกันจนแกนผลึกผิดที่ไปน้อยกว่า 1-2 องศาจึงปรับอย่างละเอียดต่อไป



รูปที่ 4.8 แสดงมุมและทิศทางที่ต้องปรับอาร์ค

ขั้นตอนมาเป็นการปรับแกนผลึกอย่างละเอียดโดยวิธีดับเบิ้ลออสซิลเลชัน (double oscillation) โดยให้ทิศที่สร้างสี่เหลี่ยมฉากกระทบกับอาร์คทั้งสองเป็น 45° (Nuffield, 1966)



รูปที่ 4.9 แสดงวิธีดับเบิ้ลออสซิลเลชันของผลึกที่ต้องการปรับมีอาร์คอยู่ในตำแหน่ง 45°

- ก. ลักษณะของอาร์คที่ถ่ายภาพออสซิลเลชัน
- ข. จุดสะท้อน R และ \bar{R} สอดคล้องกับ A และ \bar{A}

ลุ่มจุด A และ B เป็นจุดโคจรผลึกส่วนกลับเรียงตัวตามอาร์คทั้งสอง โดยมีจุด P เป็นจุดกำเนิด ถ้าจุด A และ B ไม่อยู่ในระนาบศูนย์สูตรของทรงกลมการสะท้อน ให้ E_1 และ E_2 เป็นมุมที่ผิดไปของจุด A และ B โดยมี Δ_1 และ Δ_2 เป็นค่าการขจัด (displacement) ของ A และ B ตามลำดับ ดังนั้นจะได้

$$\Delta_1 = PD \cdot E_1$$

โดยที่ E_1 มีหน่วยเป็นเรเดียน และรัศมีทรงกลมการสะท้อนมีค่าเท่ากับ 1 r.l.u. ดังนั้น

$$PD = \sqrt{2}$$

$$\Delta_1 = \sqrt{2} \cdot E_1$$

พิจารณาจุด A ตัดทรงกลมการสะท้อนทำให้เกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ไปตกลงบนฟิล์มที่จุด R และเมื่อหมุนอาร์คทั้งสองไป 180° จุด \bar{A} ตัดทรงกลมการสะท้อนเกิดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เช่นเดียวกันที่จุด \bar{R} กำหนด x_1 เป็นระยะจาก R ถึง \bar{R} ที่ระยะ ON บนระนาบศูนย์สูตรตามรูปที่ 4.9 (ข) จะได้

$$\frac{\overline{RR}}{\overline{AA}} = \frac{RN}{AM} = \frac{ON}{OM}$$

โดยที่ RN คือระยะ $\frac{x_1}{2}$, OM คือรัศมีของทรงกลมการสะท้อนที่มีค่าเป็น 1 r.l.u., ON คือรัศมีของกล่องให้ที่มีค่าเป็น r และ AM ก็คือ Δ_1 มีค่าเป็น $\sqrt{2} E_1$ ดังนั้นเราจึงได้

$$x_1 = 2 \sqrt{2r} E_1$$

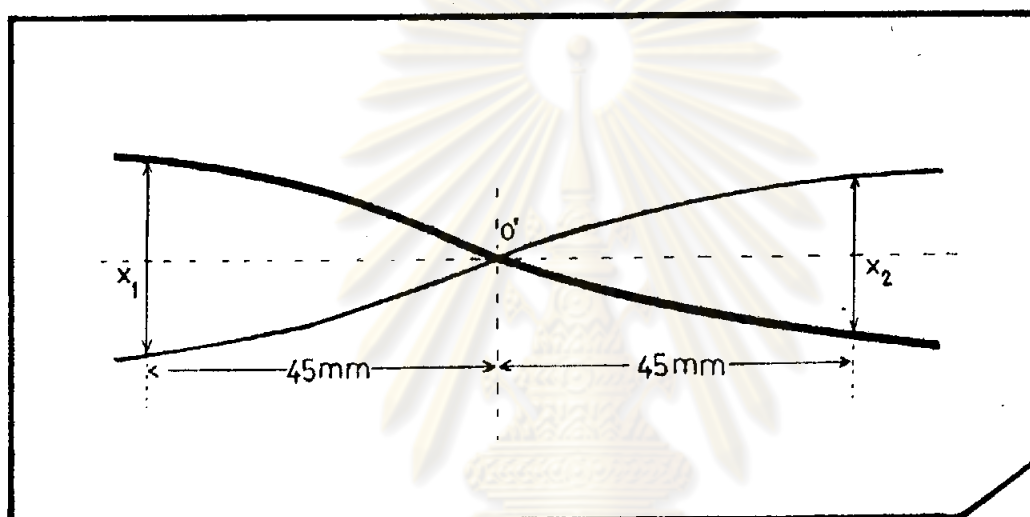
โดยที่ r มีค่าเท่ากับ $\frac{90}{\pi}$ มิลลิเมตร, x_1 หน่วยเป็นมิลลิเมตรด้วยเมื่อแทนค่า r และเปลี่ยนค่า E_1 จากหน่วยของเรเดียนเป็นองศาจะได้

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} x_1 \approx 0.71 x_1$$

ทำนองเดียวกันจะได้

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} x_2 \approx 0.71 x_2$$

ค่า x_1 และ x_2 สามารถวัดได้โดยตรงบนฟิล์มที่ได้จากภาพถ่ายแบบดับเบิลเอ็กซ์โพสิชัน โดยให้ผลึกหมุนในช่วง ± 7.5 องศาจากตำแหน่งรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบนครั้งหนึ่งและอีกครั้งหนึ่ง หมุนอาร์คไป 180 องศาจากตำแหน่งเดิม และเวลาที่ใช้อาบรังสีเอ็กซ์ควรต่างกันประมาณ 3 เท่าเพื่อจะให้เห็นความแตกต่างของความเข้มของเส้นเลย์เออร์ (layer line) อย่างชัดเจนตามรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงเส้นเลย์เออร์ที่ปรากฏบนฟิล์มที่ถ่ายโดยวิธีดับเบิลเอ็กซ์โพสิชัน

จากรูปที่ 4.10 ค่า x_1 และ x_2 ต้องวัดที่ระยะ 45 มิลลิเมตร ทั้งซ้ายขวาของจุด O' ซึ่งเป็นแนวเส้นศูนย์สูตรบนฟิล์มเป็นการเลี้ยวเบนที่มุมเลี้ยวเบน $2\theta = 90^\circ$ ตัดทรงกลมการสะท้อนและตัดฟิล์มที่ระยะทาง 45 มิลลิเมตร จากจุด O' ของตำแหน่งที่รังสีตกกระทบบนฟิล์ม

4.4.2 การถ่ายภาพพอลิคริสตัลไลน์

หลังจากการปรับให้แกนหมุนของผลึกตั้งฉากกับลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบบน ถูกต้องแล้วจึง เริ่มถ่ายภาพพอลิคริสตัลไลน์ เพื่อตรวจสอบผลึกและคำนวณหาหน่วยเซลล์ทางแกนหมุนของผลึก

ในการทดลองใช้รังสีเอ็กซ์เป้า โมลิบดีนัมซัลไฟด์ $K\alpha$ ($\lambda_{Mo K\alpha} = 0.7107 \text{ \AA}$)
 มีเซอโคเนียม (zirconium) เป็นตัวกรอง รังสีโดยให้แกนหมุนผลึกเป็น
 แกน a หมุนกลับไปมาในช่วง ± 100 องศา ใช้เวลาในการถ่ายภาพ 10 ชั่วโมง ได้ภาพถ่าย
 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เมื่อวัดระยะระหว่างเลเยอร์ที่ 0 กับเลเยอร์ที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ
 จะสามารถคำนวณหาหน่วยเซลล์ตามแกน a โดยอาศัยความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4.12 ข. ดังนี้

$$a = \frac{n \lambda}{\sin \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{y_n}{r} \right) \right\}}$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในที่นี้คือ 0.7107 \AA
 y_n คือระยะระหว่างเลเยอร์ที่ 0 กับเลเยอร์ที่ n
 r คือรัศมีของกล้องมีค่าเป็น 28.65 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายออสซิลเลชันรอบแกน a ในช่วง ± 100 องศาใช้รังสีเอ็กซ์ชนิด $MoK\alpha$

ตารางที่ 4.4 แสดงหน่วยเซลล์ a จากภาพถ่ายออสซิลเลชัน

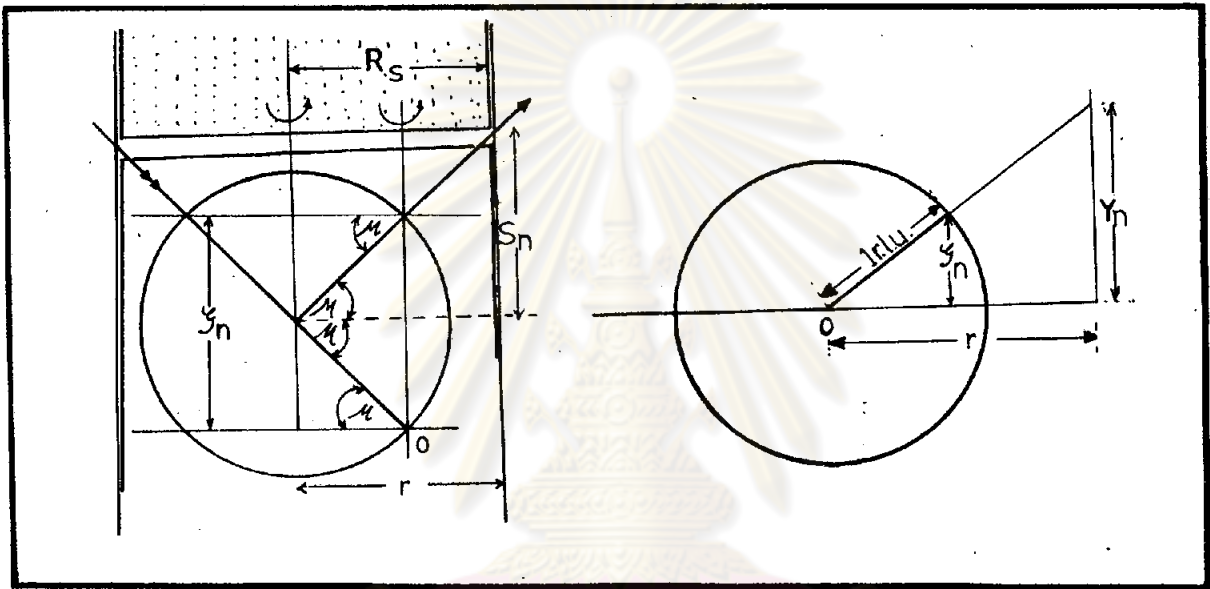
n	$2 y_n$ (mm.)	$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{y_n}{r}\right)$	$\sin \theta_n$	a (Å)
2	13.2	12.97	0.2244	6.33
4	28.7	26.61	0.4479	6.34
6	52.1	42.28	0.6728	6.33
			$\langle c \rangle =$	6.33

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าเลเยอร์ที่ใช้หาหน่วยเซลล์เป็น 2, 4, 6 ไม่ใช่ 1, 2, 3 ทั้งนี้เนื่องจากโลหะผสมตัวนี้มีลุ่มมาตรฐานเป็นเฟสเซนเตอร์คิวบิก ดังนั้น ดัชนีผลเลอรั h, k และ l ต้องเป็นเลขชนิดเดียวกันคือเป็นเลขคู่หรือเลขคี่ ซึ่งทำให้เลเยอร์เลขคี่ไม่ปรากฏมีแต่เลเยอร์ที่เป็นเลขคู่คือ 2, 4, 6 เท่านั้น

4.4.3 การถ่ายภาพไวซ์เซนเบอร์ก

หลังจากถ่ายภาพแบบออสซิลเลชันแล้วจึงทำการถ่ายภาพแบบไวซ์เซนเบอร์ก ซึ่งใช้หลักของฟิล์มเคลื่อนที่สอดคล้องกับการหมุนของผลึกโดยฟิล์มเคลื่อนที่หนึ่งมิลลิเมตรผลึกจะหมุนไปเป็นมุมสององศา การถ่ายภาพแต่ละครั้งจะถ่ายได้เพียงหนึ่งเลเยอร์เท่านั้น ดังนั้นเลเยอร์อื่นที่ไม่ต้องการจึงต้องละทิ้งโดยใช้ตัวกันเลเยอร์ (layer line screen) เป็นตัวกัน และเมื่อต้องการถ่ายภาพสำหรับเลเยอร์ที่สูงขึ้นไปเช่น เลเยอร์ 2, 4, 6, ... ขึ้นไป ตามลำดับจะใช้วิธีมุมเอียงเท่ากัน (equi-inclination method) โดยต้องเอียงกล้องเพื่อให้รังสี เอ็กซ์ตกกระทบทำมุมกับแกนหมุนของผลึกเท่ากับรังสีเลี้ยวเบนทำมุมกับแกนหมุน

ดังรูปที่ 4.12 จุดตัดระหว่างแกนหมุนของโครงผลึกส่วนกลับกับเลย์เออร์ที่จะถ่ายอยู่บนวงกลม การสะท้อนและต้องเลื่อนตัวกันเลย์เออร์ไปเพื่อให้สอดคล้องกับการเสี้ยวเบนของเลย์เออร์ที่ต้องการถ่าย มุมที่ต้องเอียงกล้อง (Buerger, 1966) และระยะที่ต้องเลื่อนตัวกันเลนส์เลย์เออร์สำหรับการถ่ายภาพเลย์เออร์ที่สูงขึ้นไปคำนวณจากความสัมพันธ์ ตามรูปที่ 4.12 ดังนี้



รูปที่ 4.12 แสดงมุมที่ต้องเอียงกล้องและความสัมพันธ์ของ ϵ กับ y_n ในโครงผลึกส่วนกลับ

$$\mu_n = \sin^{-1} \left[\frac{\sin \left\{ \tan^{-1} \left(\frac{y_n}{r} \right) \right\}}{2} \right]$$

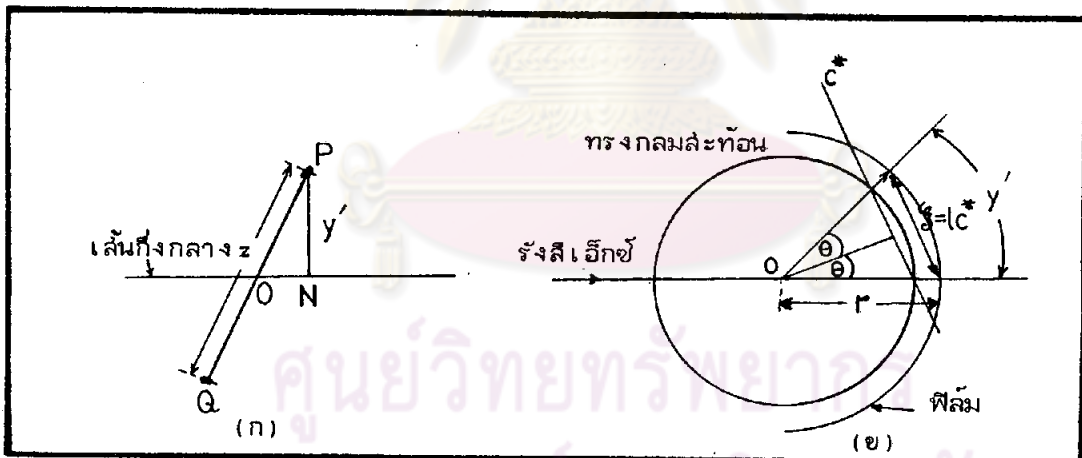
$$S_n = R_s \tan \mu_n$$

- โดยที่
- μ_n คือมุมเอียงของกล้องที่ใช้ถ่ายภาพสำหรับเลย์เออร์ที่ n
 - y_n คือระยะบนฟิล์มจากเลย์เออร์ที่ 0 ไปยังเลย์เออร์ที่ n
 - r เป็นรัศมีของกล้องมีค่า 28.65 มิลลิเมตร
 - S_n คือระยะที่เลื่อนตัวกันเลนส์เลย์เออร์
 - R_s คือรัศมีของตัวกันเลนส์เลย์เออร์มีค่า 25.5 มิลลิเมตร
 - ϵ_n คือระยะระหว่างเลย์เออร์ที่ 0 ถึงเลย์เออร์ที่ n
- ในหน่วย โครงผลึกส่วนกลับ

จากภาพถ่ายไวซ์เซนเบอร์กให้ผลึกหมุนรอบแกน a พบว่าเลขีเออร์ที่ 0, 2 และ 4 เหมือนกัน ดังนั้นจึงได้แสดงภาพถ่ายเลขีเออร์ที่ 0 และ 2 ตามรูปที่ 4.14 (ก) และ (ข) และสามารถคำนวณหาหน่วยเซลล์ b และ c ได้จากภาพถ่ายแบบไวซ์เซนเบอร์กเลขีเออร์ที่ 0 (Jeffery, . 1971) มีความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) ดังนี้

$$c = \frac{l \lambda}{2 \sin\left(\frac{z}{\sqrt{5}}\right)}$$

โดยที่ l คือค่าดัชนีผลเลอรัลสำหรับแกนผลึกที่ใช้หาหน่วยเซลล์
 z คือระยะระหว่างจุดบนแกนผลึกที่จุดละท่อน 001 ถึง 001



รูปที่ 4.13 แสดงจุดละท่อนที่เกิดขึ้นบนภาพถ่ายไวซ์เซนเบอร์ก (ก) จุดละท่อน P และ Q ห่างเส้นกึ่งกลางเท่ากัน (ข) การเกิดจุดละท่อนบนฟิล์ม

สำหรับค่าหน่วยเซลล์ที่คำนวณได้จากภาพถ่ายแบบไวซ์เซนเบอร์กเลขีเออร์ที่ 0 ได้แสดงไว้บนตารางที่ 4.5 ซึ่งได้ค่าของ b และ c มีค่าเท่ากัน



(ข)



(ก)

รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายวีซีดีของเบอร์กัส a เป็นแกนหมุนของผลึก
 (ก) ภาพถ่ายเลเบอร์ที่ 0, (ข) ภาพถ่ายเลเบอร์ที่ 2

ตารางที่ 4.5. แสดงหน่วยเซลล์ตามแกน c

h	k	l	z (mm.)	$\sin \left(\frac{z}{5} \right)$	c (Å)
0	0	2	14.40	0.1122	6.33
0	0	4	28.85	0.2233	6.37
0	0	6	43.70	0.3345	6.37
< c > =					6.36

4.5 การหาค่าความหนาแน่นของโลหะผสม $\text{Pb}_{0.6} \text{Sn}_{0.2} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$

ลักษณะโลหะผสมที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นก้อนซึ่งมีขนาดเพียงพอที่จะใช้ในการหาค่าความหนาแน่นได้ โดยวิธีการแทนที่น้ำเพื่อหาปริมาตรของก้อนผลึกและใช้สูตร

$$D = \frac{M}{V}$$

โดยที่ D คือความหนาแน่น, M คือ มวล และ V คือปริมาตร

ของก้อนผลึก

การทดลองนำก้อนผลึกที่เตรียมได้มาชั่งด้วยเครื่องชั่งไฟฟ้าละเอียด (ละเอียด 0.1 มิลลิกรัม) ได้ทำการชั่ง 2 ครั้ง พบว่าน้ำหนักมวลเฉลี่ยเป็น 0.4212 กรัม และเมื่อนำผลึกไปแทนที่น้ำในขวดที่ให้หาความถ่วงจำเพาะขนาด 5 ซม.³ ปรากฏว่าได้ปริมาตรเท่ากับ 0.0524 ซม.³ ดังนั้นค่าความหนาแน่นของโลหะผสม $\text{Pb}_{0.6} \text{Sn}_{0.2} \text{Ge}_{0.2} \text{Te}$ จึงได้

$$D = \frac{0.4212}{0.0524}$$

$$= 8.04 \quad \text{กรัม ซม.}^3$$

4.6 การรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนของผลึกเดี่ยว

ข้อมูลความเข้มของผลึกเดี่ยววัดจากภาพถ่ายไวซ์เซนเบอร์เกอร์ที่เลขีเออร์ 0 ตามรูปที่ 4.14 (ก) การถ่ายภาพไวซ์เซนเบอร์เกอร์ทำโดยเทคนิคการซ้อนฟิล์มไข่แผ่นเหล็กเปลว (Iron foil) บาง ๆ ก็ระหว่างฟิล์มที่ซ้อนกันใช้เวลาในการถ่ายภาพต่าง ๆ กันเป็นชุด ๆ ดังนี้

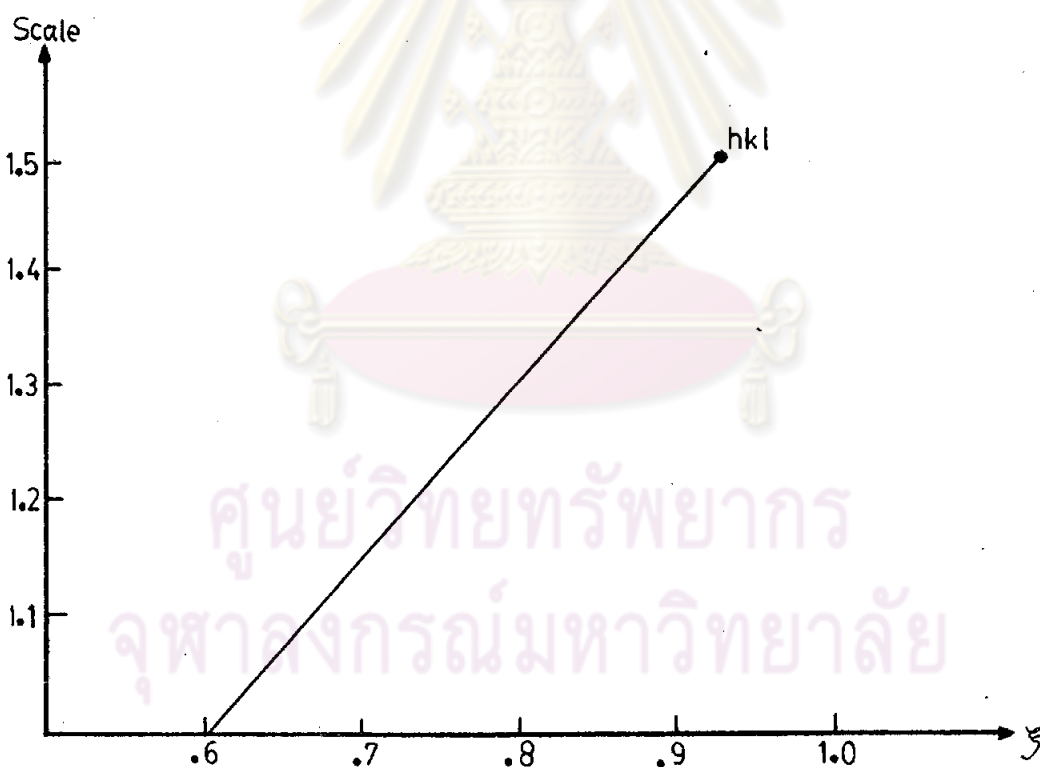
ชุดที่หนึ่งใช้เวลาอบรังสี 200 ชั่วโมง ไข่ฟิล์มซ้อนกัน 3 แผ่น

ชุดที่สองใช้เวลาอบรังสี 30 ชั่วโมง ไข่ฟิล์มซ้อนกัน 2 แผ่น

ชุดที่สามใช้เวลาอบรังสี 15 ชั่วโมง ไข่ฟิล์มซ้อนกัน 2 แผ่น

ทำลากลความเข้มมาตรฐานจากจุดละท่อนจุดใดจุดหนึ่งบนฟิล์มภาพถ่ายไวซ์เซนเบอร์เกอร์ที่เลขีเออร์ที่ 0 โดยเลือกจุดละท่อนที่มีความเข้มสูงพยายามหลีกเลี่ยงจุดที่อยู่บนแนวเส้นแสงขาว (white radiation streak) จุดละท่อนที่เลือกควรมีรูปร่างคล้ายกับจุดละท่อนส่วนใหญ่ที่ปรากฏบนฟิล์ม ทำลากลความเข้มมาตรฐานโดยถ่ายภาพไวซ์เซนเบอร์เกอร์เฉพาะจุดนั้นนับจำนวนรอบที่ผลึกหมุนไป จะได้ความเข้มสัมพันธ์เท่ากับจำนวนรอบที่ผลึกหมุน เมื่อผลึกหมุนได้จำนวนรอบที่ต้องการก็เลื่อนฟิล์มไปเล็กน้อย แล้วถ่ายภาพไวซ์เซนเบอร์เกอร์เฉพาะจุดนั้นโดยใช้จำนวนรอบต่าง ๆ กัน โดยวิธีนี้จะได้ความเข้มของจุดละท่อนเป็นเลขจำนวนเต็มซึ่งมีค่าเรียงลำดับซึ่งไข้เป็นความเข้มมาตรฐานเป็นดังนี้ 374, 312, 260, 216, 180, 150, 124, 103, 86, 72, 60, 50, 42, 35, 29, 24, 20, 17, 14, 12, 10, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1 100. สำหรับ 2 และ 1 อาจมากจนวัดไม่ได้จึงมีความเข้ม 100 ปิดท้าย ทำลากลความเข้มมาตรฐานที่ทำไว้ไปเปรียบเทียบกับความเข้มของจุดละท่อนที่ได้ทำการถ่ายไว้ทั้งสามชุด ถ้าจุดละท่อนมีความเข้มใกล้เคียงกับความเข้มบนลากลมาตรฐานให้ถือว่าจุดละท่อนมีความเข้มเดียวกับความเข้มของจุดบนลากล เมื่อวัดความเข้มของจุดละท่อนบนฟิล์มแต่ละแผ่นแล้วจะต้องปรับความเข้มของจุดละท่อนไปสู่ความเข้มของฟิล์มแผ่นแรกแล้วจึงหาค่าเฉลี่ยของความเข้มของจุดละท่อนทุกจุด จุดละท่อนที่ปรากฏบนฟิล์มในช่วงค่า ξ สูง ๆ จุดจะเริ่มแยกออกจากกันเพราะรังสีเอ็กซ์ที่ใช้คือ $\text{MoK}\alpha$ มีความยาวคลื่น 2 ค่าใกล้เคียงกันคือ $\text{MoK}\alpha_1$ และ $\text{MoK}\alpha_2$ ค่าความเข้มที่ต้องการวัดเป็นความเข้มเนื่องจากรังสีเอ็กซ์ $\text{K}\alpha$ เฉลี่ย ดังนั้นการแก้ความผิดพลาดของความเข้มเนื่องจากการแยกของ $\text{K}\alpha_1$ และ $\text{K}\alpha_2$ จึงกระทำได้ด้วย

การวัดค่า ξ ของจุดสะท้อนที่จุดเริ่มแยกจากกันและวัด ξ ของจุดสะท้อนที่แยกจากกันเป็น 2 จุดพอดีแล้วนำค่า ξ ทั้งสองค่าไปเขียนกราฟโดยให้จุดสะท้อนที่เริ่มแยกจากกันมีค่าสเกล เป็น 1 และตำแหน่งที่จุดสะท้อนแยกเป็น 2 จุดพอดีมีค่าสเกลเป็น 1.5 เขียนกราฟระหว่าง ξ กับสเกลตัวคูณโดยอาศัยจุดทั้งสองซึ่งถือเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.15 แล้วจึงวัดค่า ξ อื่น ๆ ของจุดสะท้อนบนฟิล์มจากนั้นอ่านสเกลจากกราฟหาค่าสเกลที่อ่านได้ไปคูณกับความเข้มที่วัดได้ในตอนแรกทำให้ได้ค่าความเข้มถูกต้องยิ่งขึ้น และจุดสะท้อนที่แยกจากกันเป็น 2 จุด แล้วทั้งหมดวัดความเข้มของจุด $K\alpha_1$ แล้วใช้สเกล 1.5 คูณกับความเข้มเดิมทำให้ได้ความเข้มถูกต้องยิ่งขึ้นเช่นกัน

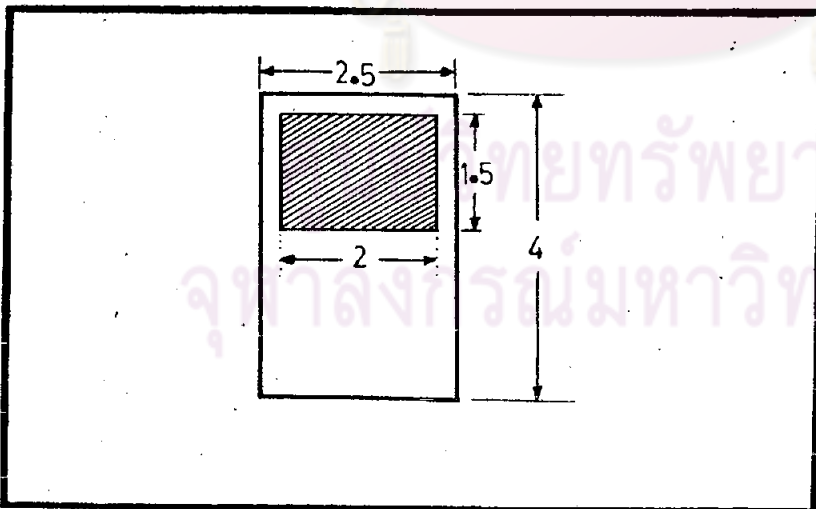


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟของสเกลตัวคูณที่ใช้ในการแก้ความผิดพลาดของความเข้มเนื่องจาก การแยกของ $K\alpha_1, K\alpha_2$

4.7 การศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผงด้วยเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์

สามารถใช้หาหน่วยเซลล์ของผลึกได้เช่นเดียวกับกล้องกีเเนียร์-เอกก์ และตรวจสอบสภาวะสมดุลของส่วนผลึกของโลหะผลึกที่เตรียมได้โดยพิจารณาลักษณะที่คของดิฟแฟรกโตแกรมที่เกิดขึ้นในแต่ละการสะท้อนซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้สภาวะของโลหะผลึกที่เตรียมไว้

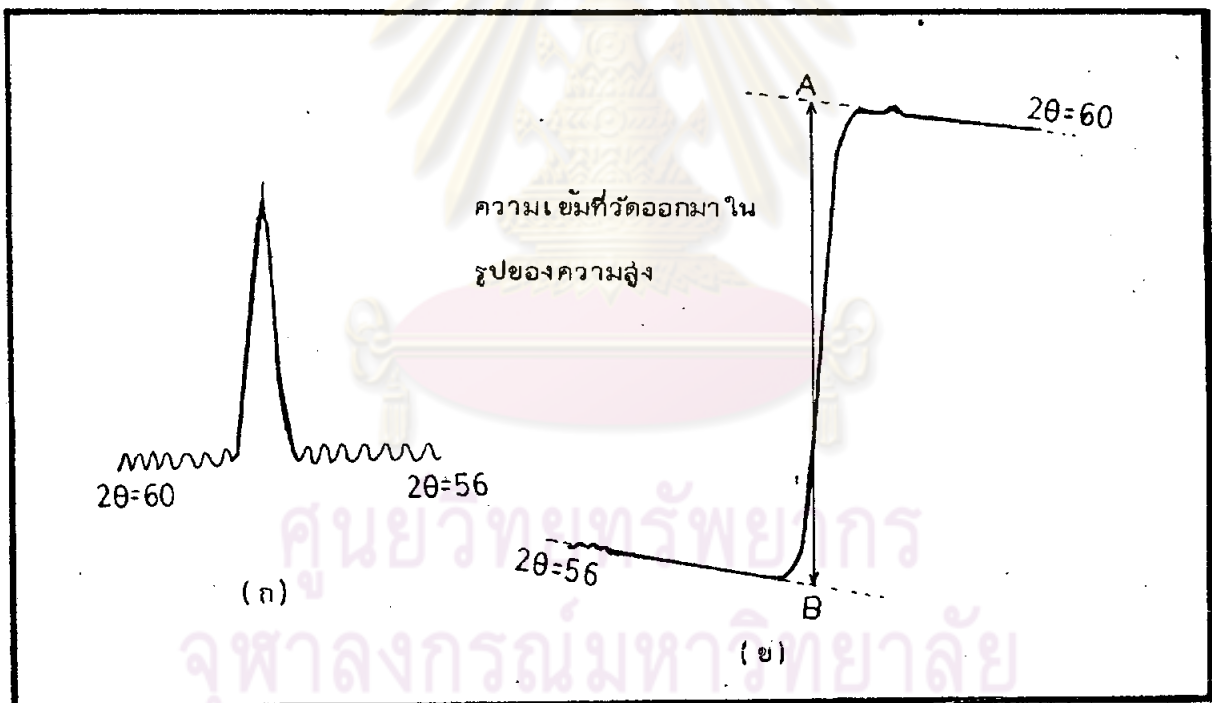
ในการทดลองการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของผลึกผง โดยใช้ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ ขึ้นแรกเตรียมผลึกผงตัวอย่าง โดยนำผลึกที่จะศึกษาไปบดให้ละเอียดเช่นเดียวกับผลึกผงตัวอย่างที่ใช้กับกล้องกีเเนียร์-เอกก์ นำผลึกผงที่บดแล้วไปใส่ในแผ่น สไลด์เล็ก ๆ ขนาดประมาณ 2.5×4 ตารางเซนติเมตร ที่ใส่ผลึกผงที่ใช้อาบรังสีมีพื้นที่ประมาณ 1.5×2 ตารางเซนติเมตร ตามรูปที่ 4.16 ใช้เอมิลอะซิเตต (amyl acetate) ซึ่งเป็นสารที่ระเหยเร็วผสมกับผลึกผงบนแผ่น สไลด์ทำให้ช่วยกระจายผลึกผงให้บางสม่ำเสมอพอใช้ตลอดพื้นที่ใส่ผลึกผง ทำการวัดรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนโดยสแกนเครื่องวัดจากมุมประมาณ $20-135^\circ$ ของ 2θ ใช้เครื่องวัดแบบสัดส่วนบันทึกรังสีเอ็กซ์เลี้ยวเบนบนแผนภูมิ (chart) ซึ่งจำเป็นต้องคอยปรับเปลี่ยนพิสัย (range) ของแต่ละพิศเพื่อให้ได้ความสูงพอเหมาะ เนื่องจากความเข้มของแต่ละการสะท้อนไม่เท่ากัน นอกจากนี้ยังทำให้เข็มชี้ใช้เขียนกราฟไม่ตื้อตล่เกล ทำให้ไม่เสียดัง่ายด้วย



รูปที่ 4.16 แสดงแผ่นสไลด์และพื้นที่ (ตารางเซนติเมตร) ของผลึกที่อาบรังสี

4.8 การรวบรวมข้อมูลความเข้มของผลึกผง

การรวบรวมข้อมูลความเข้มของผลึกผงโดยใช้เครื่องดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ใช้ 2 วิธี วิธีแรกใช้เครื่องอินทิเกรเตอร์แพคเกจต่อเข้ากับเครื่องดิฟแฟร็กโตมิเตอร์โดยตรง ซึ่งอธิบายการใช้เครื่องมือไว้แล้วในบทที่ 3 วัดความเข้มโดยต่ออินทิเกรเตอร์แพคเกจกับเครื่องเขียนกราฟ $x - y$ ($x - y$ recorder) โดยการอินทิเกรตทีละพิคให้เครื่องวัดแบบสไลด์ส่วนสแกนผ่านพิคเริ่มจากแบคกราวด์ข้างหนึ่งสแกนพิคไปเครื่องเขียนกราฟก็จะเขียนเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.17(ก)เมื่ออินทิเกรตผ่านพิคจนถึงแบคกราวด์อีกข้างหนึ่งแล้วจึงหยุดสแกน เวลาที่ใช้ในการอินทิเกรตพิคละ ประมาณ 3-4 นาที อินทิเกรตพิคแรกหุ้ม 2θ เท่ากับ 23°



รูปที่ 4.17 แสดงภาพพิคที่ $2\theta = 56^\circ$ ถึง $2\theta = 60^\circ$

(ก) จากดิฟแฟร็กโตแกรม

(ข) จากเครื่องเขียนกราฟ $x - y$

ทำที่ละฟิคนึงมุม $2\theta = 134^\circ$ จนได้ข้อมูลรวม 13 การสะท้อน การวัดความเข้มสามารถวัดได้โดยตรงซึ่งตามรูปที่ 4.17 (ข) ก็คือระยะ AB ที่อ่านได้บนเครื่องเขียนกราฟ x-y นั้นเอง สิ่งสำคัญคือต้องปรับความเข้มที่วัดได้ให้อยู่ในพิสัยเดียวกันทั้งหมด

เครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์ที่ใช้รังสีเอ็กซ์เป้าทองแดง ($\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1.5418 \text{ \AA}$)

โดยมีนิเกิลเป็นตัวกรองรังสีโซลิตา 40 kV กระแส 30 mA โดยมีเงื่อนไขต่าง ๆ สำหรับเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์ตามตารางที่ 4.6 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ได้เลือกไว้

ตารางที่ 4.6 แสดงเงื่อนไขที่ใช้กับเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์วิธีแรก

scanning speed ($\frac{2\theta}{\text{min}}$)	paper speed ($\frac{\text{cm}}{\text{min}}$)	time constant (sec)	gain	pulse height selection	
				lower level (%)	window level (%)
1	1	1	32	35	25

ส่วนวิธีที่สอง เก็บข้อมูลความเข้มโดยการวัดพื้นที่ใต้เส้นโค้งของดิฟแฟรกโตแกรมโดยตรงซึ่งทำได้โดยแบ่งพื้นที่ใต้เส้นโค้ง เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ เพื่อสะดวกในการนับสำหรับกรณีพื้นที่นั้นมีขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ที่อยู่ขอบ ๆ ซึ่งไม่เป็นรูปก็นับโดยเฉลี่ยกับพื้นที่เล็ก ๆ สด ๆ กันไป ส่วนเงื่อนไขต่าง ๆ สำหรับเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์ได้มีการเปลี่ยนแปลงจากแบบแรกเพื่อให้สามารถวัดพื้นที่ใต้เส้นโค้งได้สะดวกขึ้นและถูกต้องขึ้นดังแสดงไว้ตามตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงเงื่อนไขที่ใช้กับเครื่องดิฟแฟรกโตมิเตอร์ วิธีที่สอง

scanning speed $\left(\frac{2\theta}{\text{min}}\right)$	paper speed $\left(\frac{\text{cm}}{\text{min}}\right)$	time constant (sec)	gain	pulse height selection	
				lower level (%)	window level (%)
$\frac{1}{4}$	2	0.5	32	35	25

การนับพื้นที่สี่เหลี่ยมใต้เส้นโค้งสามารถทำได้ สะดวกแต่สิ่งสำคัญต้องทำให้ความเข้ม
อยู่ในสเกลของพีสัยเดียวกันก่อนที่จะนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย