

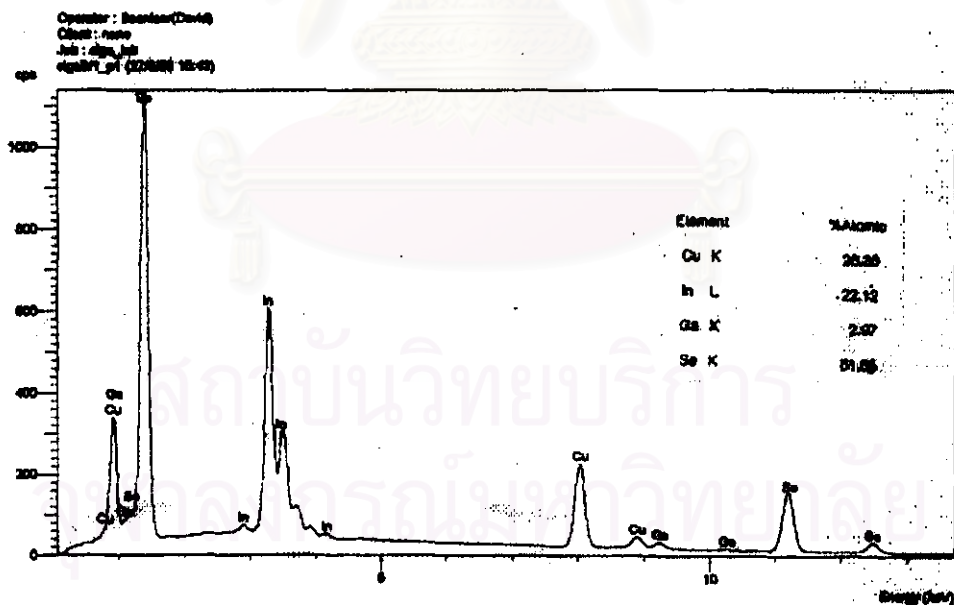
บทที่ 6

ผลการทดลอง

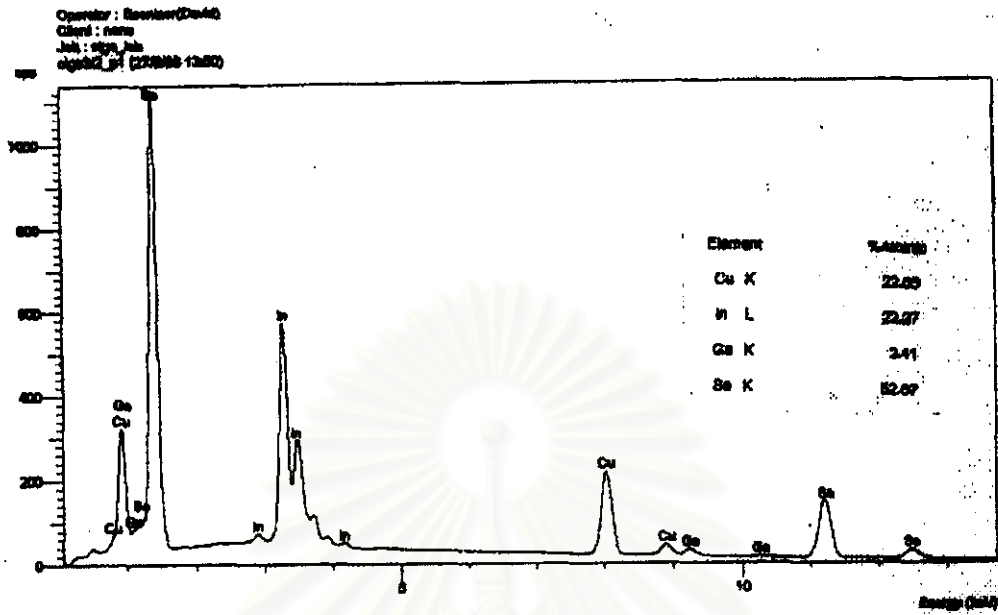
6.1 ผลการศึกษาส่วนประกอบของผลึก CIGS

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ปลูกผลึกขึ้นมาจำนวน 5 หลอด แต่ละหลอดแบ่งเป็นส่วนๆ แล้วนำไปศึกษา หาส่วนประกอบของสารในแต่ละส่วนโดยการวิเคราะห์ผลึกด้วยเทคนิคการใช้ EDX (energy dispersive x-ray analysis) โดยผลที่ได้จะเป็นรูปของสเปกตรัม (spectrum) ของ x-ray ที่ถูกจับได้โดย EDS (energy dispersive spectrometer)

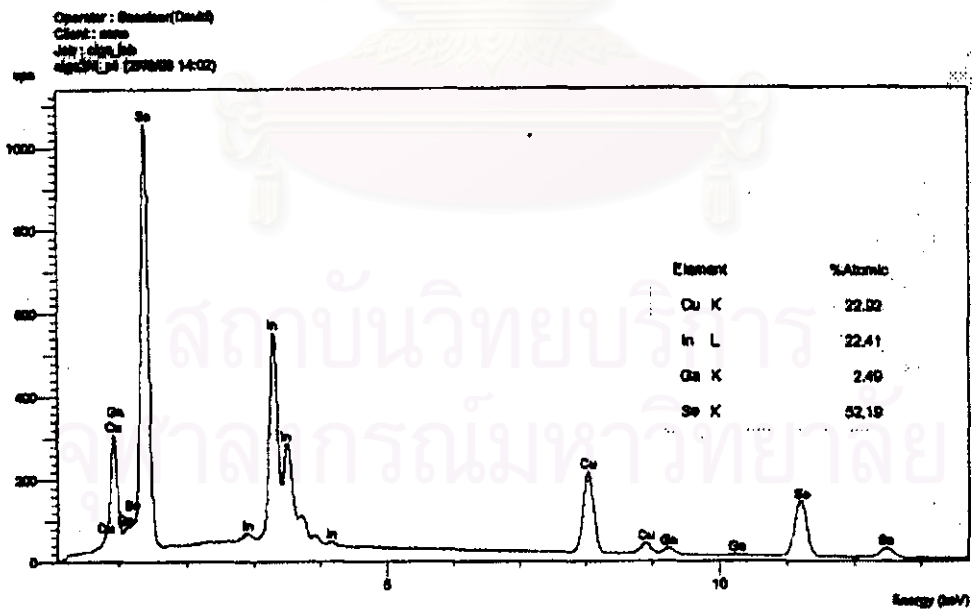
โดยในการคำนวณหาปริมาณส่วนประกอบของสารต่างๆ จะเลือกสเปกตรัม x-ray ที่ระดับพลังงานสูง มาคำนวณ และตัดสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับกัน (overlap) ทิ้ง ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกสเปกตรัมมาคำนวณดังนี้ Cu ใช้ K line , Ga ใช้ K line , Se ใช้ K line และ In ใช้ L line



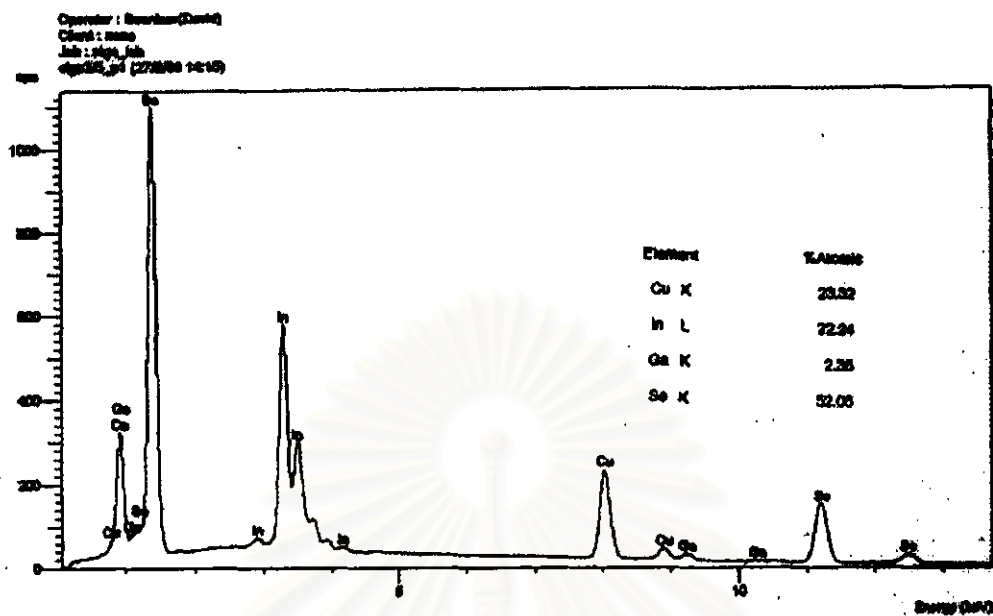
รูปที่ 6.1 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/1



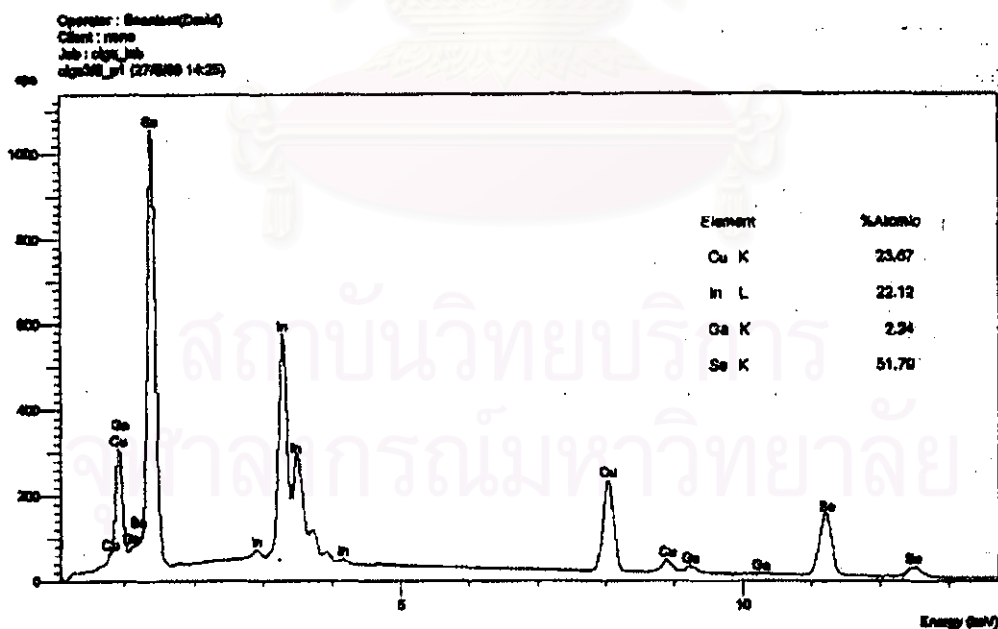
รูปที่ 6.2 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/2



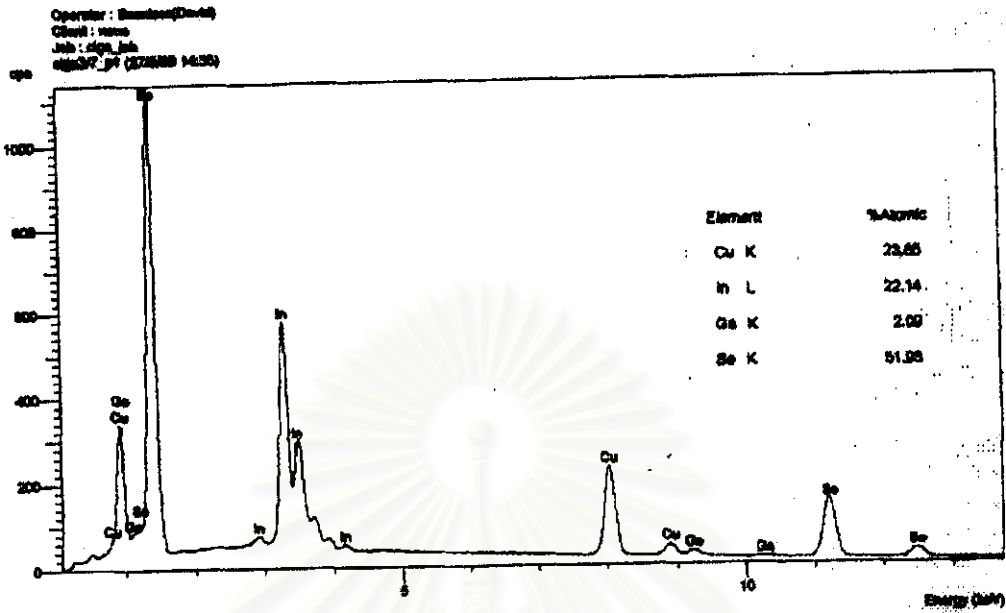
รูปที่ 6.3 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/4



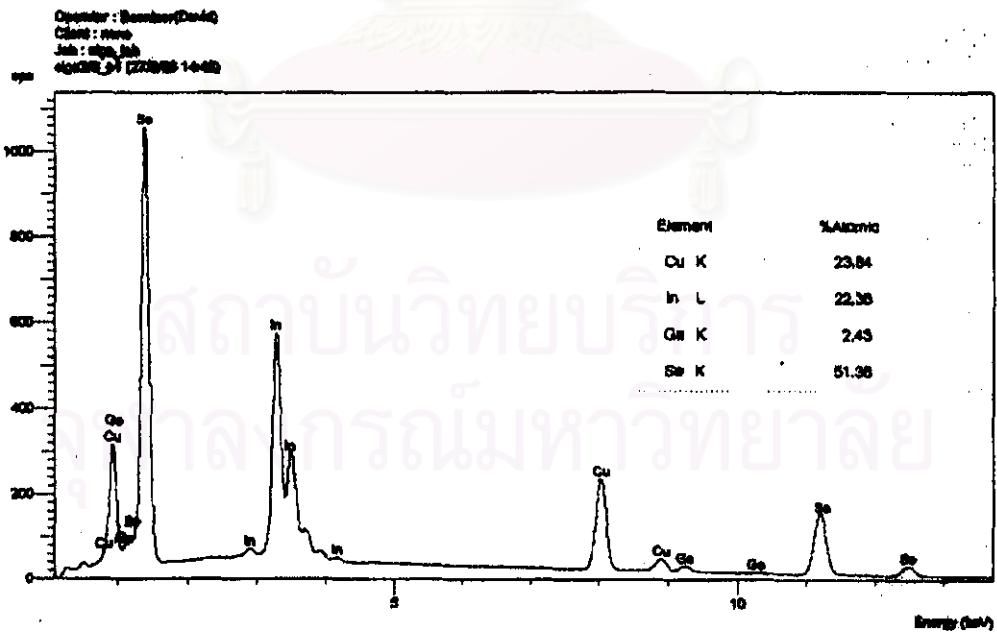
รูปที่ 6.4 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/5



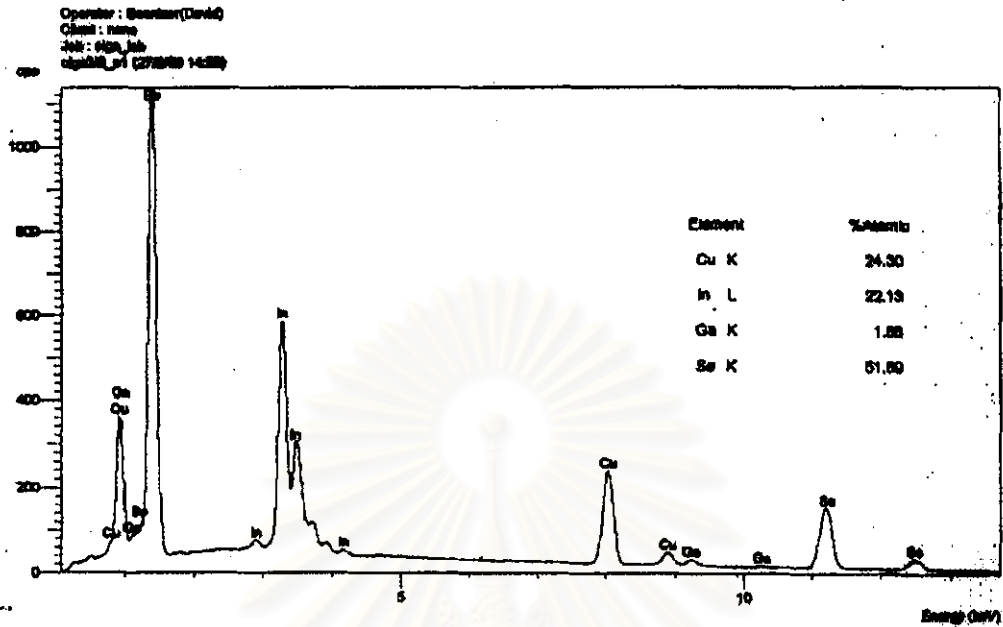
รูปที่ 6.5 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/6



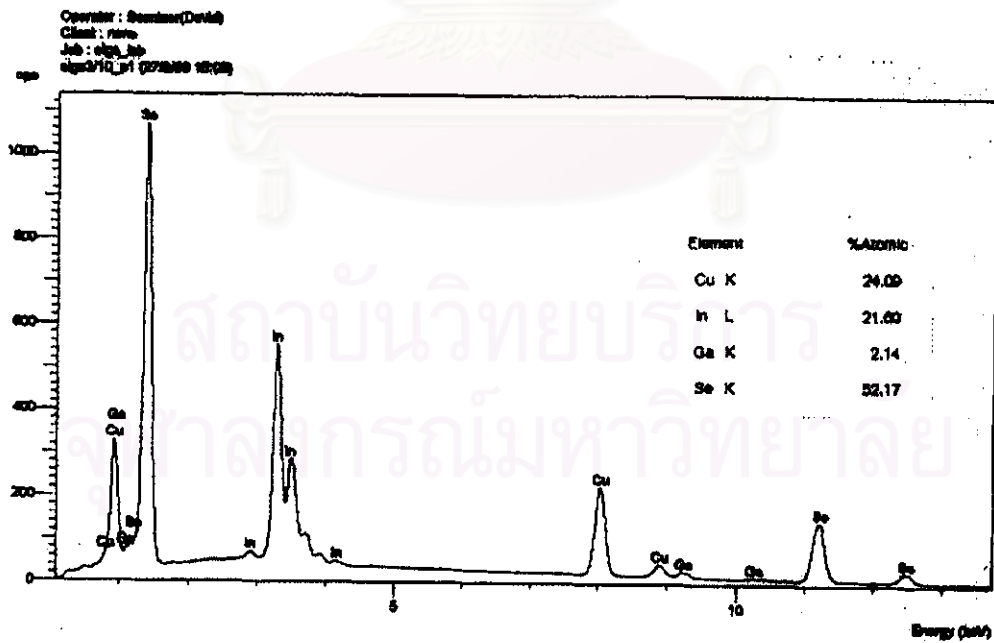
รูปที่ 6.6 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/7



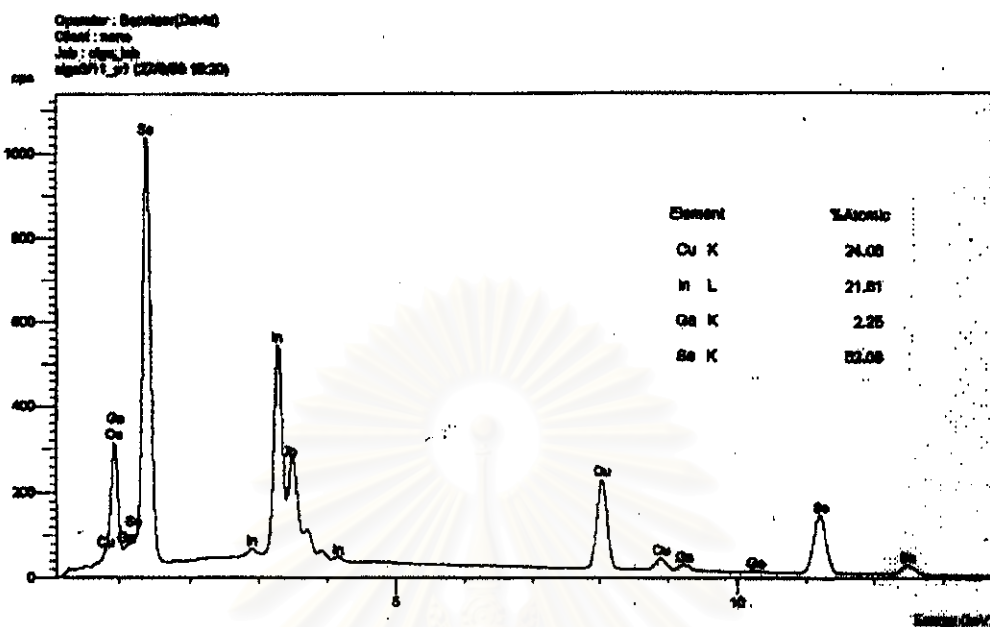
รูปที่ 6.7 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/8



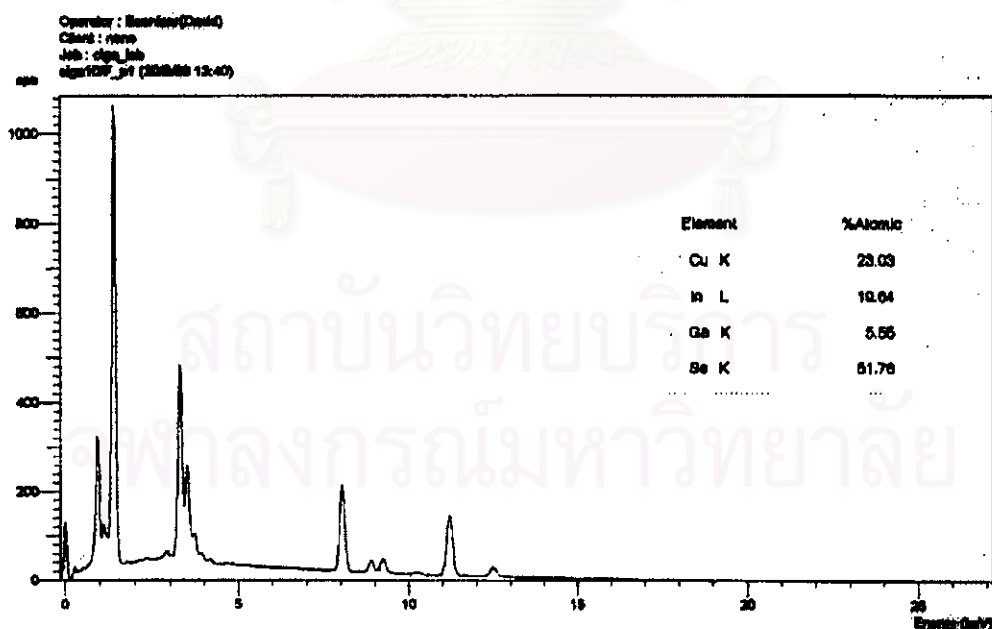
รูปที่ 6.8 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/9



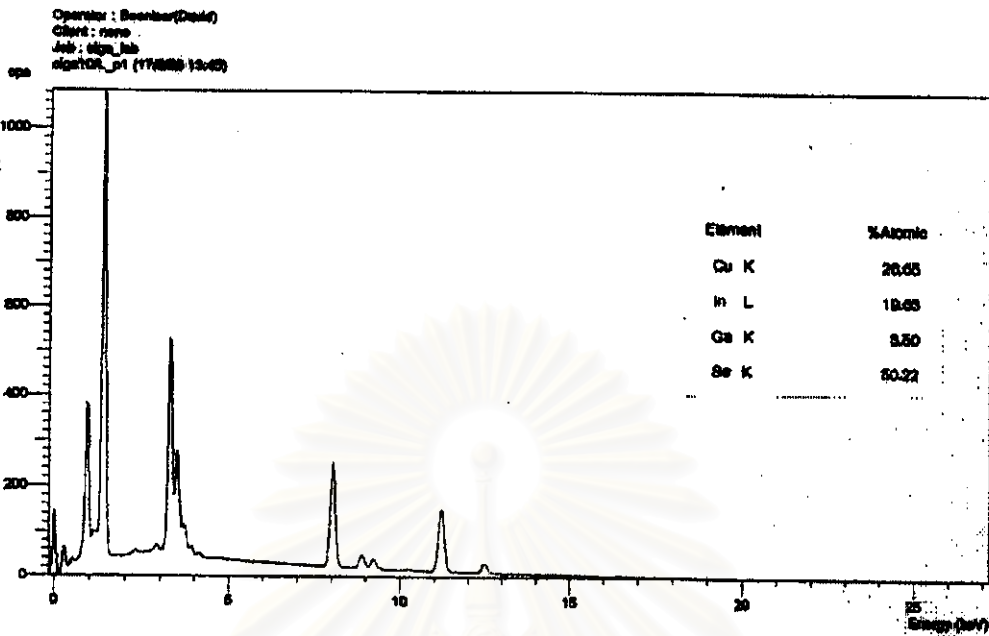
รูปที่ 6.9 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/10



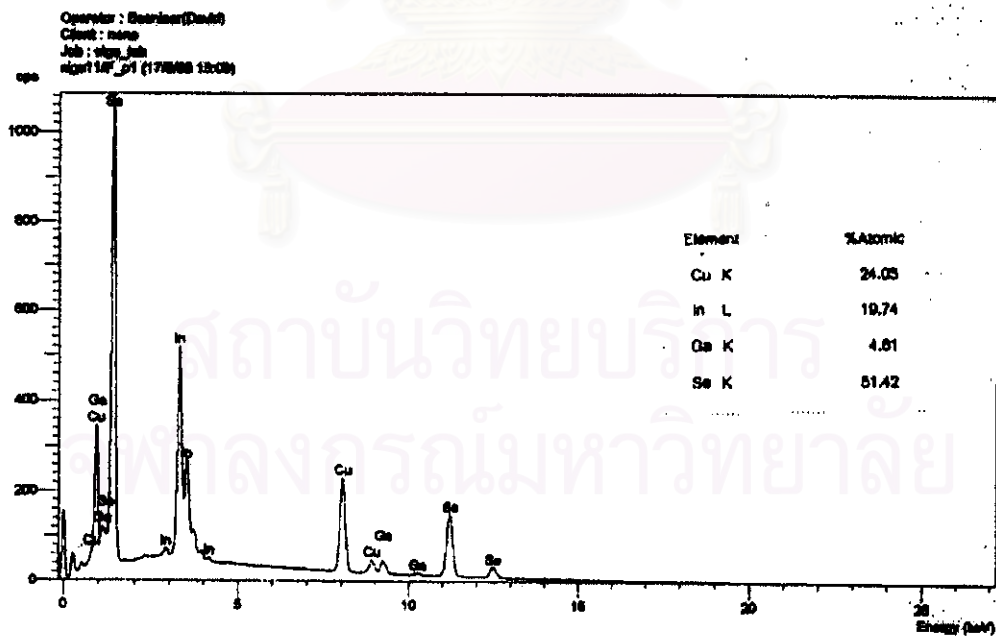
รูปที่ 6.10 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS3/11



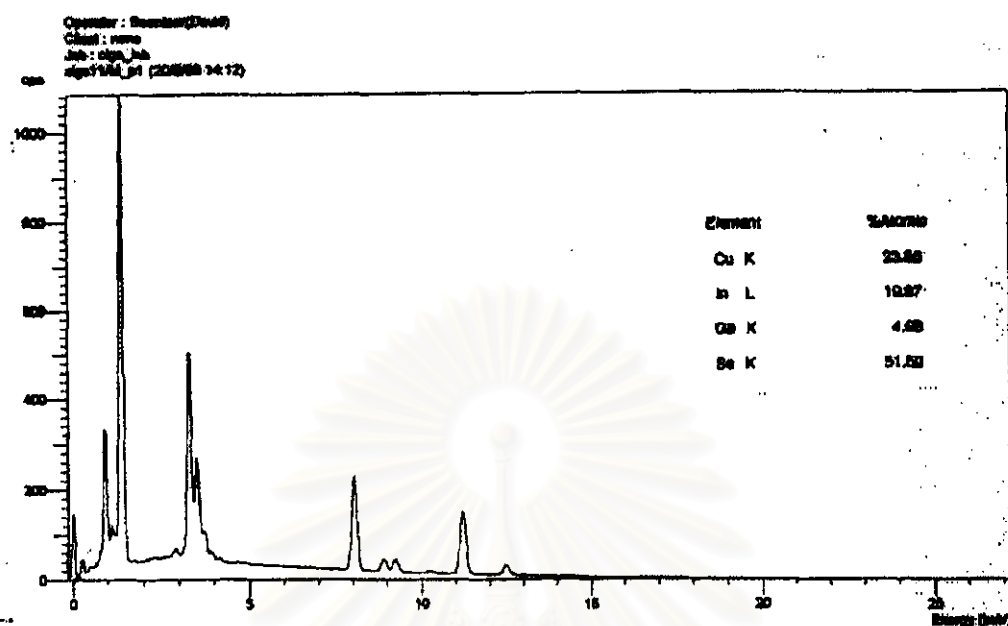
รูปที่ 6.11 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS10/F



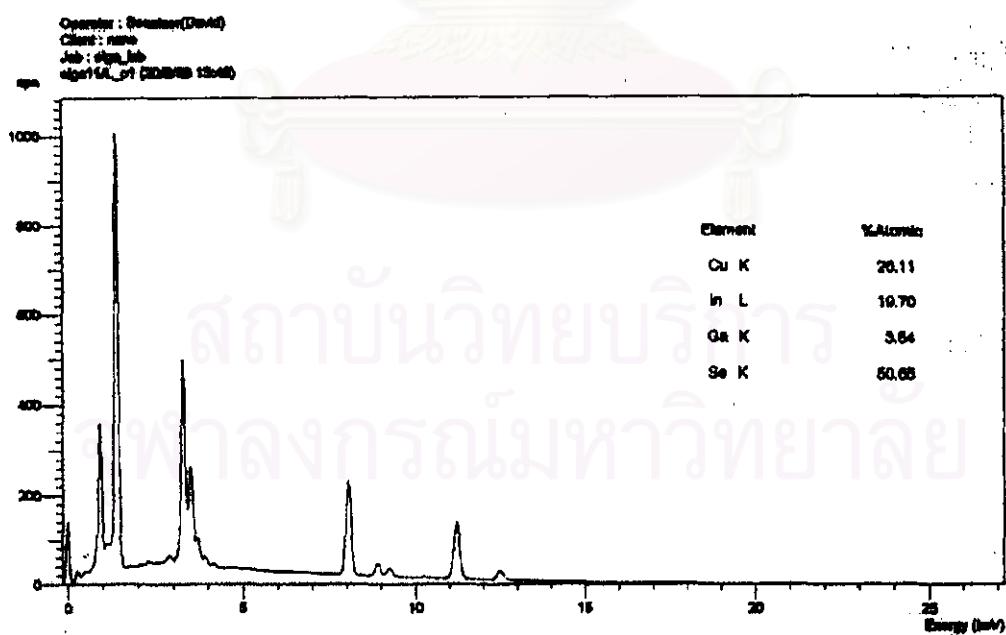
รูปที่ 6.12 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS10/L



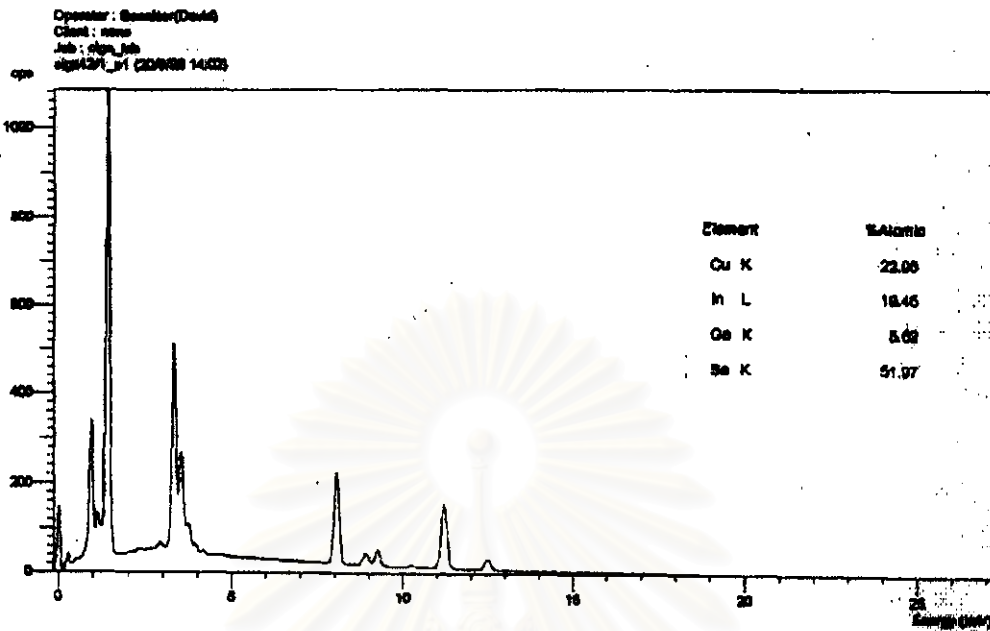
รูปที่ 6.13 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS11/F



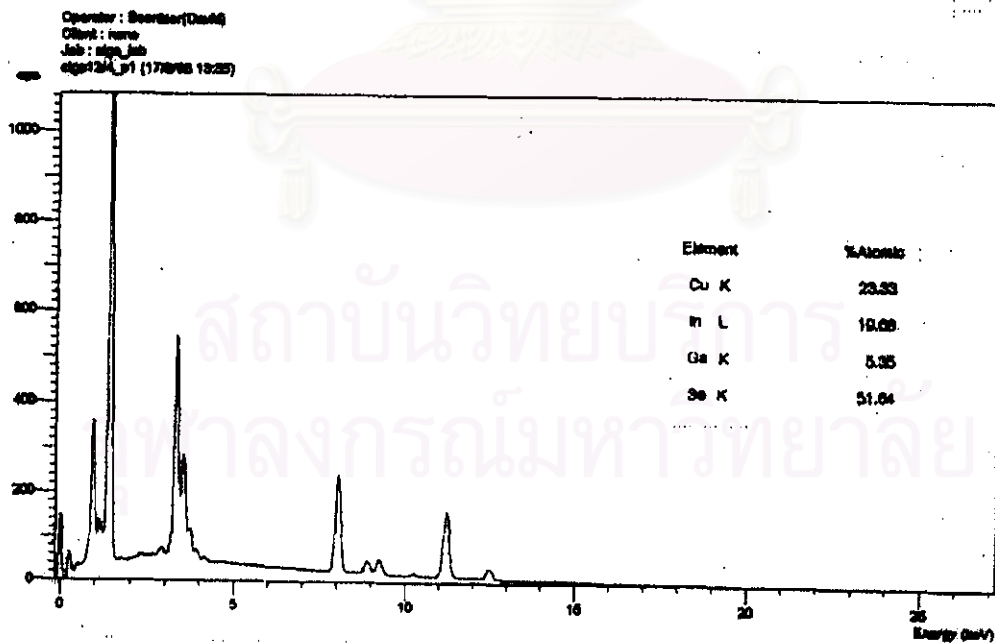
รูปที่ 6.14 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS11/M



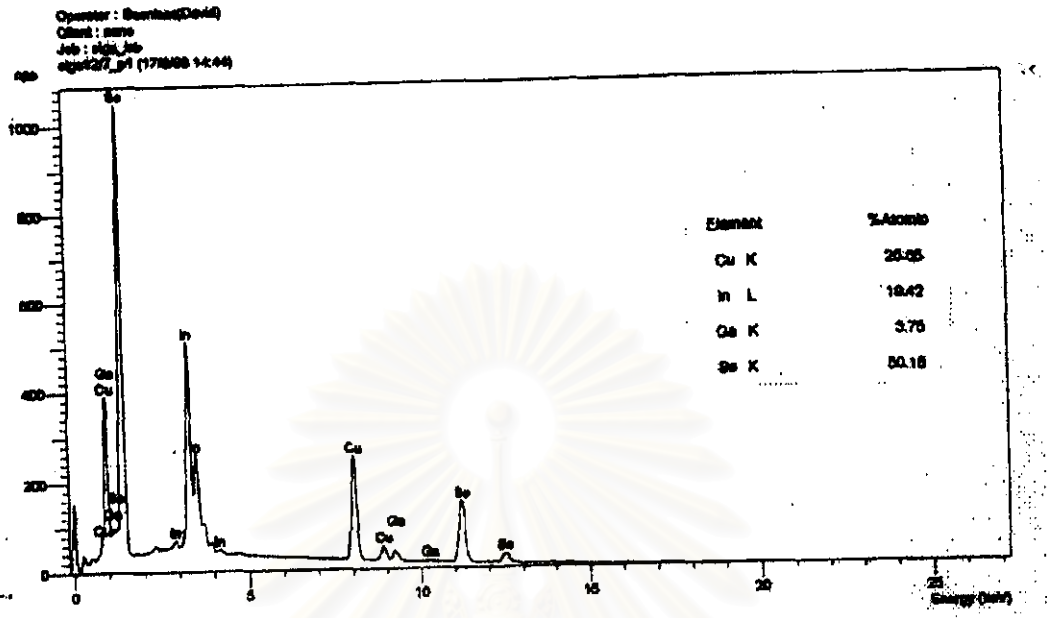
รูปที่ 6.15 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS11/L



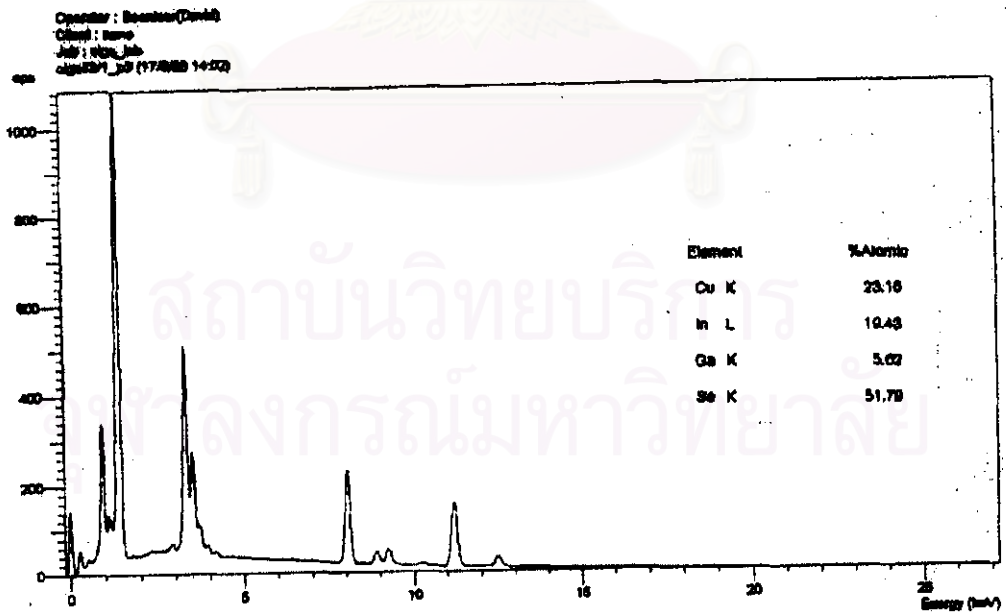
รูปที่ 6.16 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS12/F



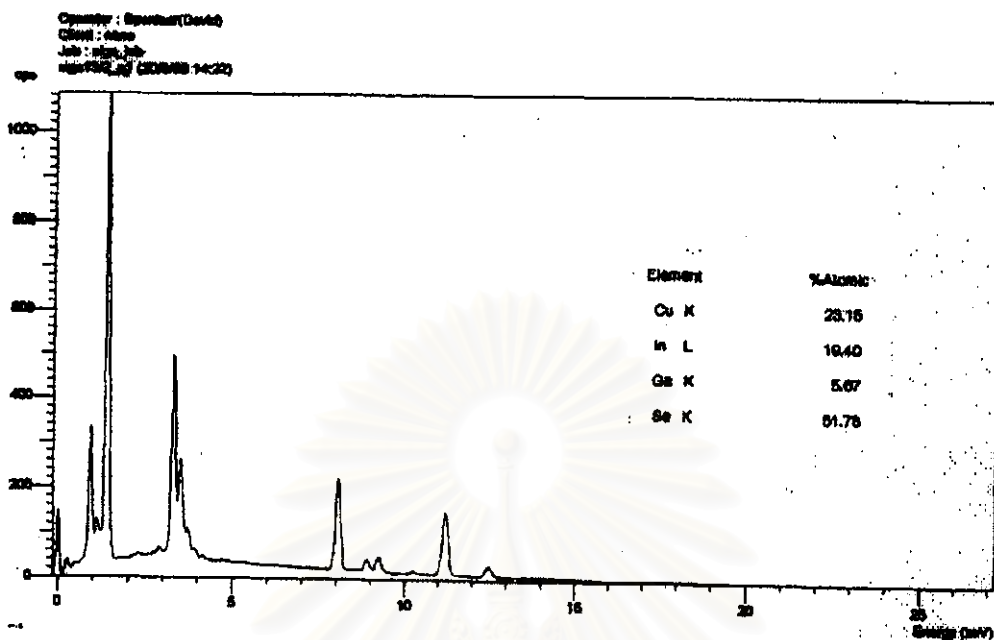
รูปที่ 6.17 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS12/M



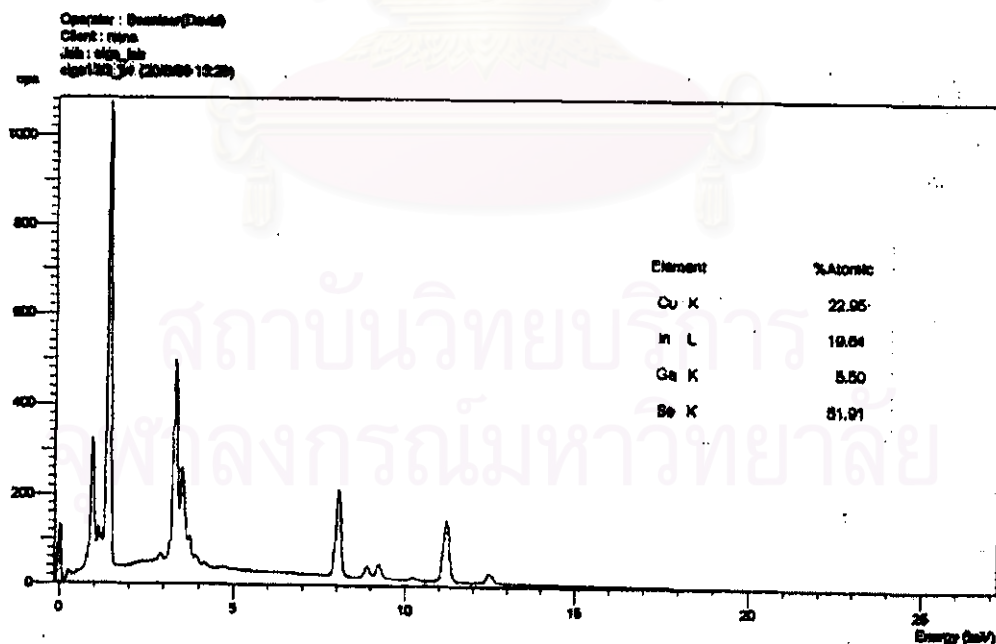
รูปที่ 6.18 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS12/L



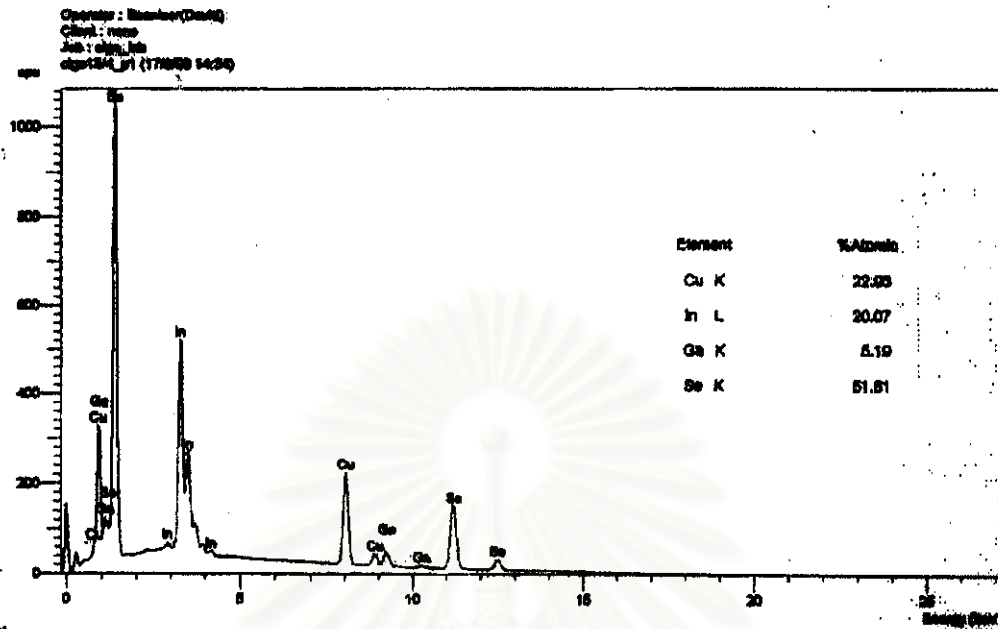
รูปที่ 6.19 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/1



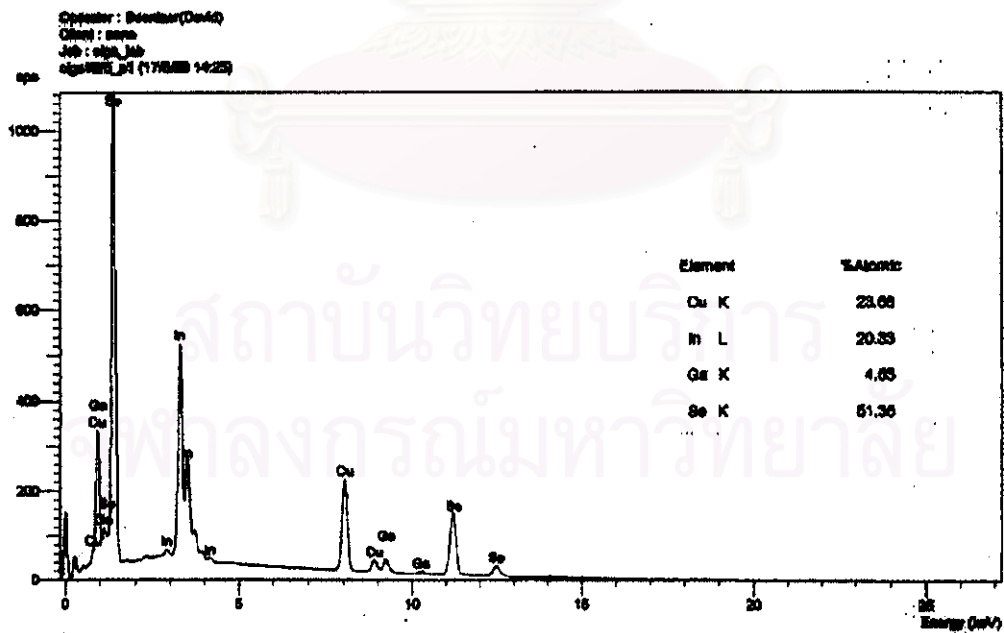
รูปที่ 6.20 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/2



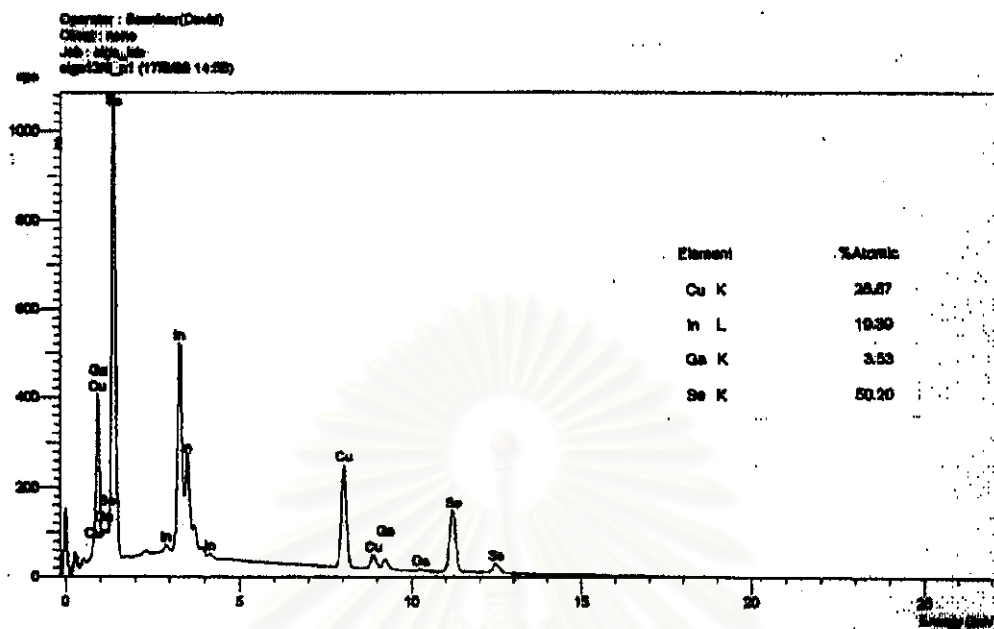
รูปที่ 6.21 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/3



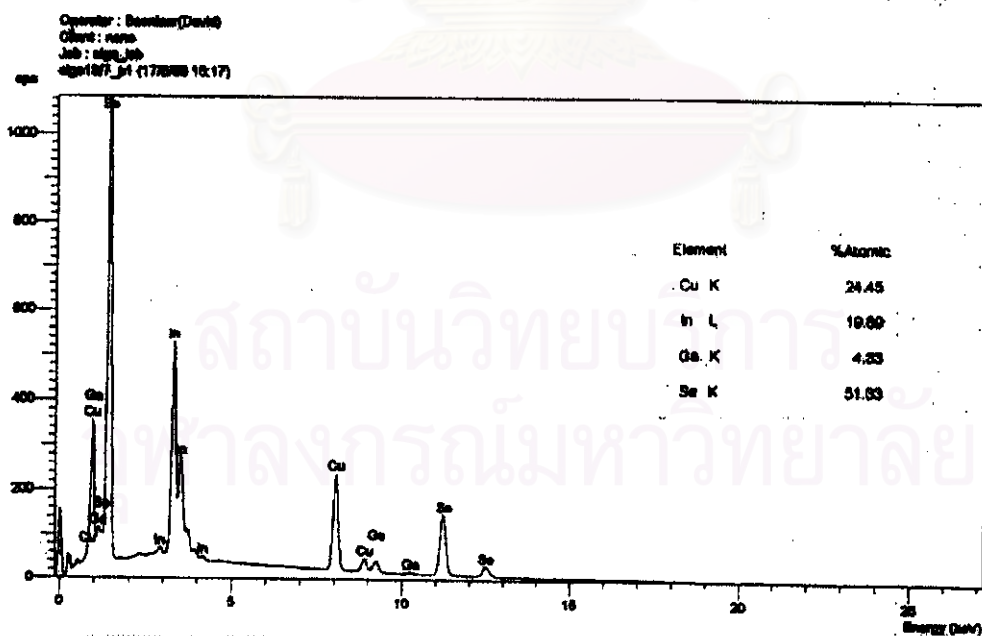
รูปที่ 6.22 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/4



รูปที่ 6.23 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/5



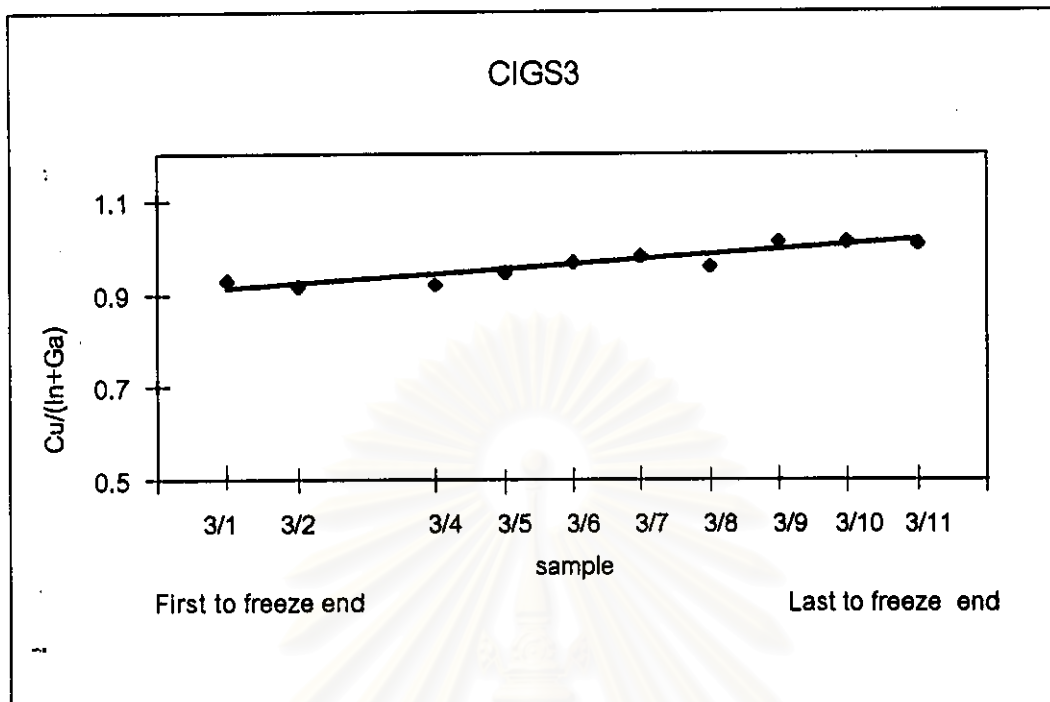
รูปที่ 6.24 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/6



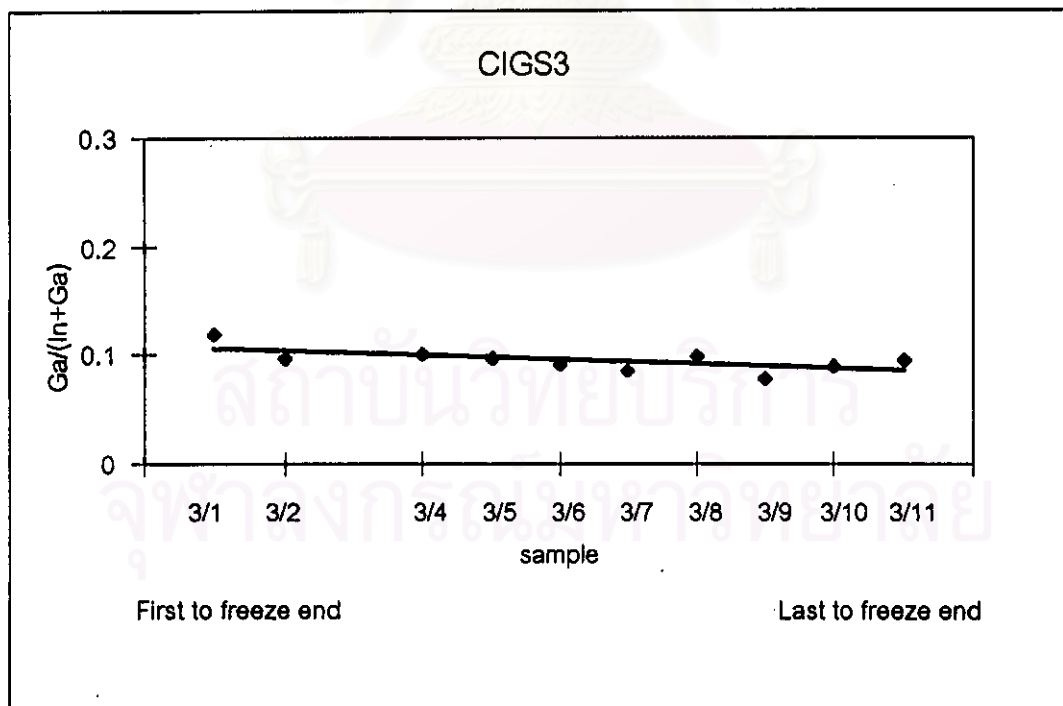
รูปที่ 6.25 สเปกตรัมจาก EDS ของผลึก CIGS13/7

ตาราง 6.1 แสดงปริมาณสารที่เป็นส่วนประกอบของผลึก CIGS

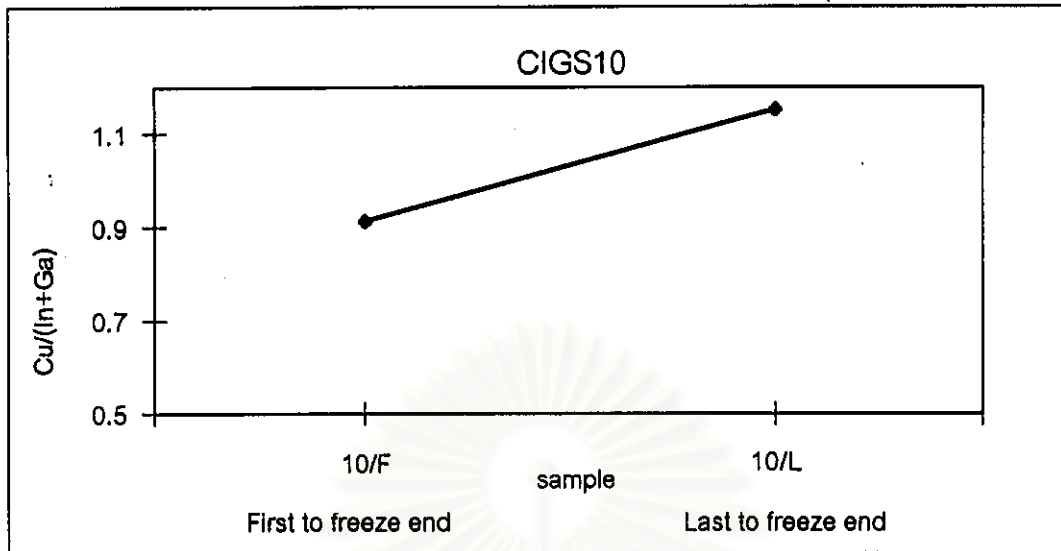
sample	Cu	In	Ga	Se	Cu/(In+Ga)	Ga/(In+Ga)	Met/Se
CIGS3/1	23.36	22.12	2.97	51.56	0.93	0.12	0.94
CIGS3/2	22.65	22.27	2.41	52.67	0.92	0.10	0.90
CIGS3/4	22.92	22.41	2.49	52.19	0.92	0.10	0.92
CIGS3/5	23.32	22.24	2.38	52.06	0.95	0.10	0.92
CIGS3/6	23.67	22.12	2.24	51.97	0.97	0.09	0.92
CIGS3/7	23.85	22.14	2.09	51.93	0.98	0.09	0.93
CIGS3/8	23.84	22.36	2.43	51.38	0.96	0.10	0.95
CIGS3/9	24.30	22.13	1.88	51.69	1.01	0.08	0.93
CIGS3/10	24.09	21.60	2.14	52.17	1.01	0.09	0.92
CIGS3/11	24.06	21.61	2.25	52.08	1.01	0.09	0.92
CIGS10/F	23.03	19.64	5.55	51.78	0.91	0.22	0.93
CIGS10/L	26.65	19.63	3.50	50.22	1.15	0.15	0.99
CIGS11/F	24.03	19.74	4.81	51.42	0.98	0.20	0.94
CIGS11/M	23.56	19.87	4.98	51.59	0.95	0.20	0.94
CIGS11/L	26.11	19.70	3.54	50.65	1.12	0.15	0.97
CIGS12/F	22.96	19.45	5.62	51.97	0.92	0.22	0.92
CIGS12/M	23.33	19.68	5.35	51.64	0.93	0.21	0.94
CIGS12/L	26.65	19.42	3.75	50.18	1.15	0.16	0.99
CIGS13/1	23.16	19.43	5.62	51.79	0.92	0.22	0.93
CIGS13/2	23.15	19.40	5.67	51.78	0.92	0.23	0.93
CIGS13/3	22.95	19.64	5.50	51.91	0.91	0.22	0.93
CIGS13/4	22.93	20.07	5.19	51.81	0.91	0.21	0.93
CIGS13/5	23.68	20.33	4.63	51.36	0.95	0.19	0.95
CIGS13/6	26.87	19.39	3.53	50.20	1.17	0.15	0.99
CIGS13/7	24.45	19.89	4.33	51.33	1.01	0.18	0.95



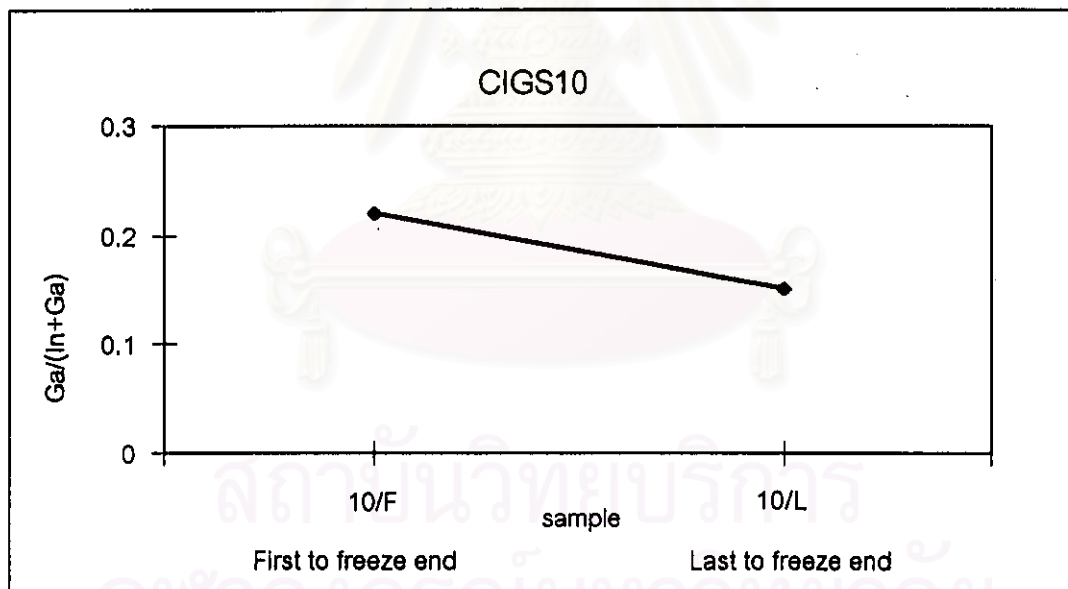
รูปที่ 6.26 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ $\text{Cu}/(\text{In}+\text{Ga})$ กับ ตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก



รูปที่ 6.27 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ กับ ตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก

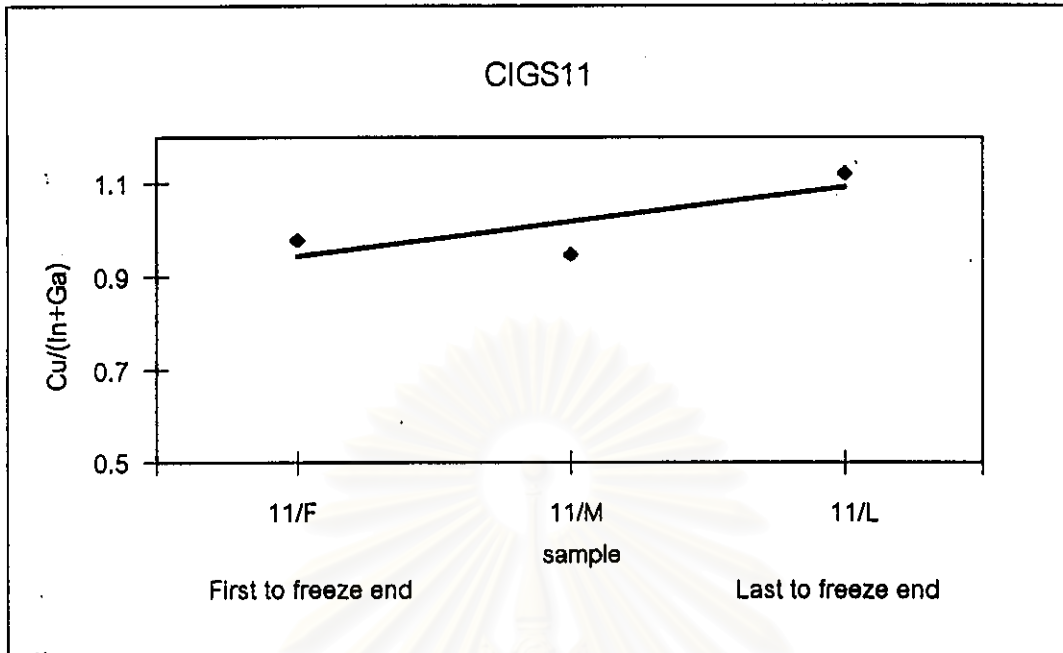


รูปที่ 6.28 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Cu/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเป็นตัวของผลึก

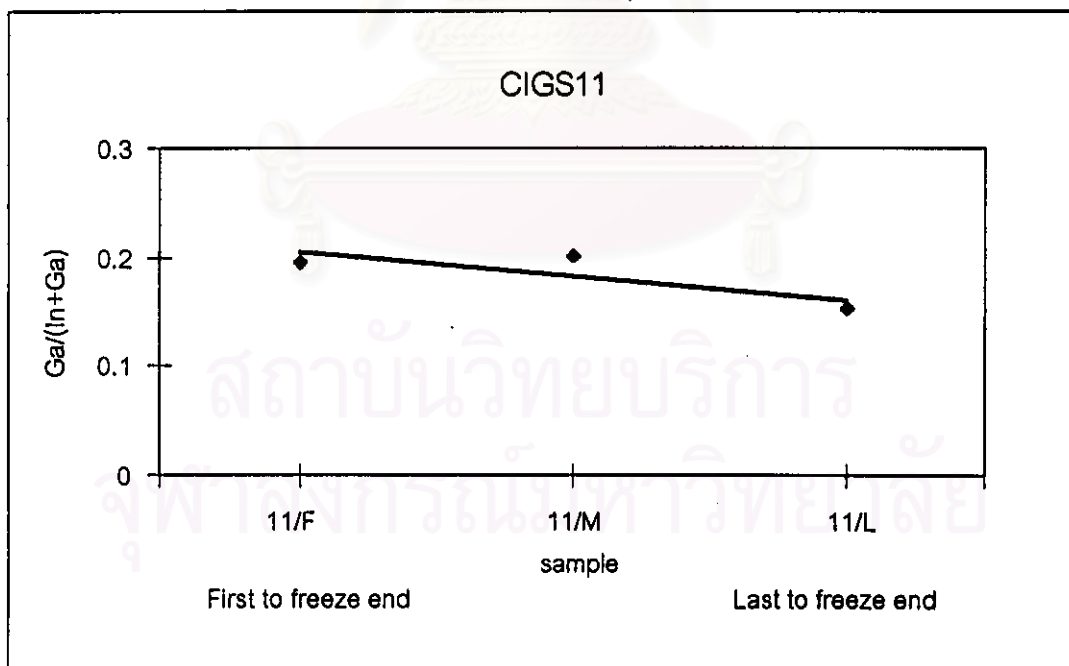


รูปที่ 6.29 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ Ga/(In+Ga) กับ ตำแหน่งการเป็นตัวของผลึก

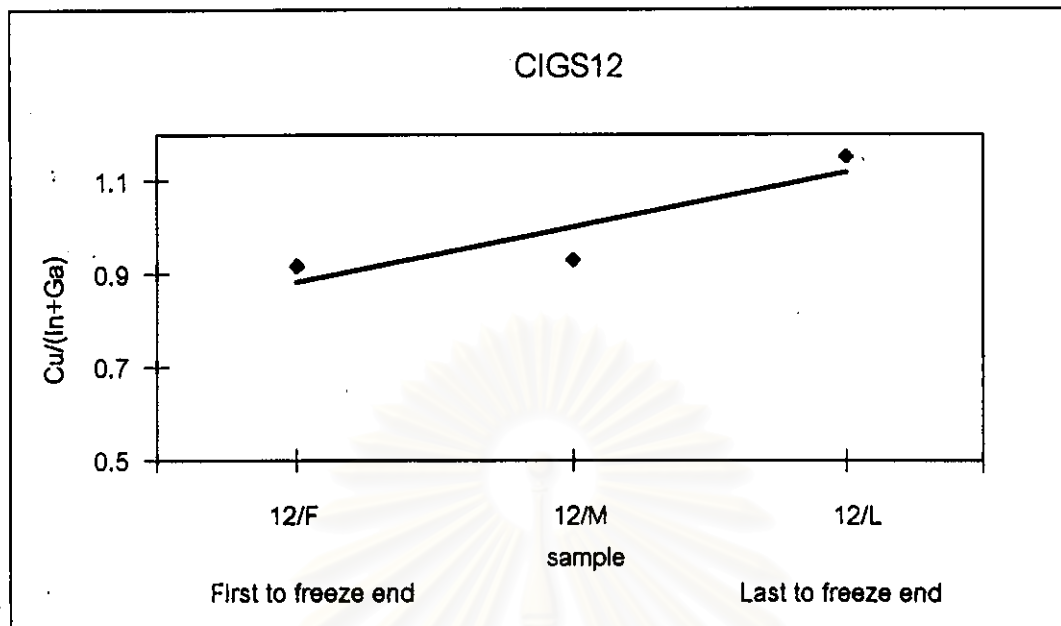
ข้อมูลส่วนกลางไม่มีเนื่องจาก sample CIGS10 ไม่ดี มีรอย crack มาก ไม่สามารถเตรียมตัวอย่างเพื่อไปทำการวัดหาปริมาณสารในส่วนนี้



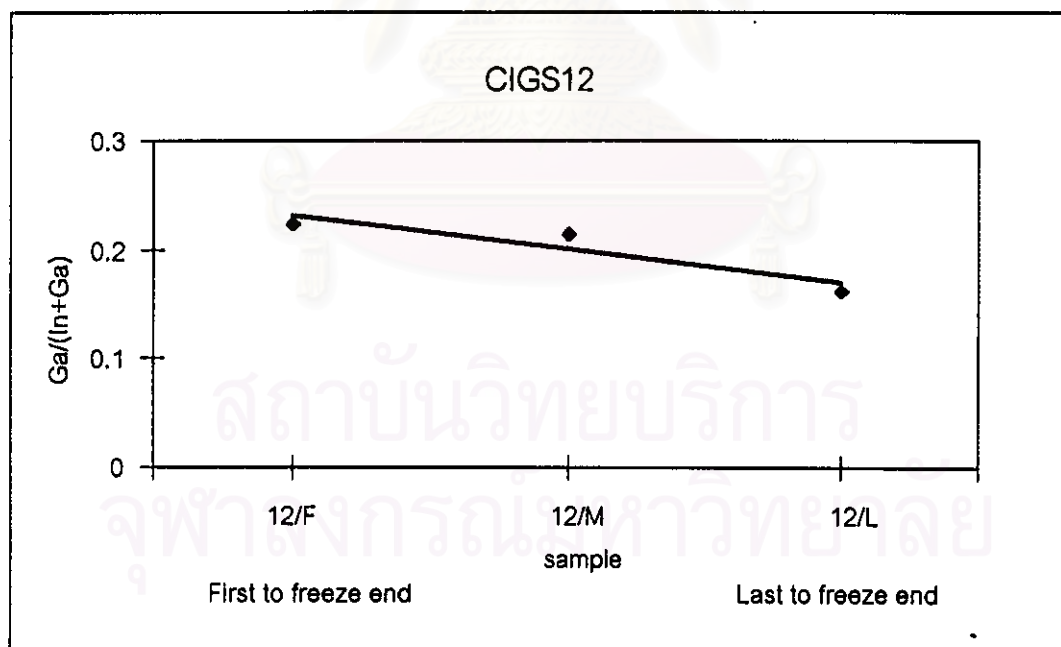
รูปที่ 6.30 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ $\text{Cu}/(\text{In}+\text{Ga})$ กับ ตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก



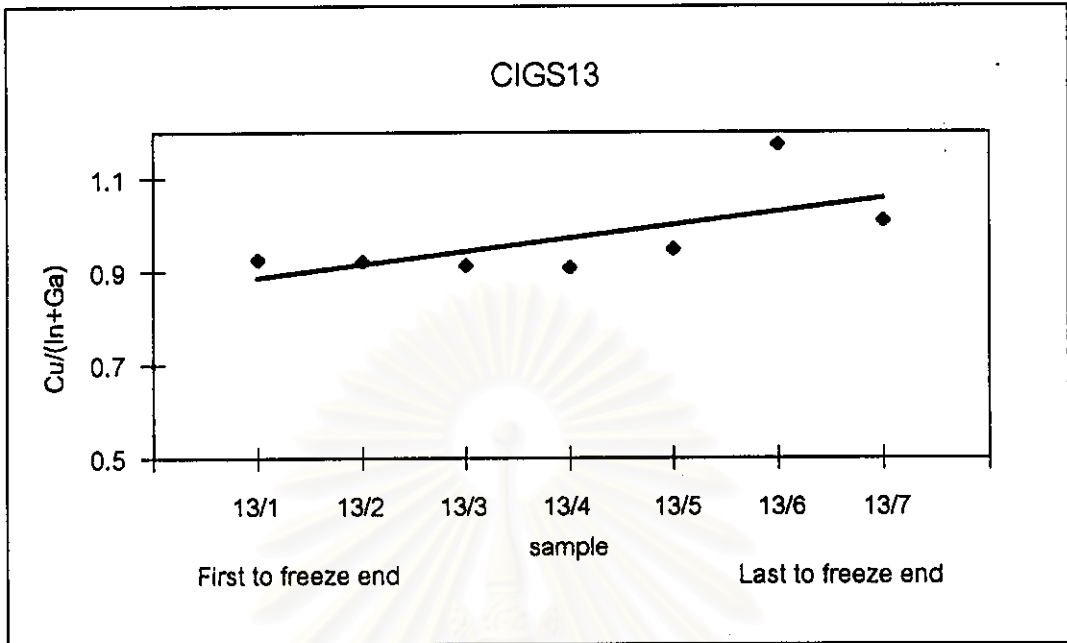
รูปที่ 6.31 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ กับ ตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก



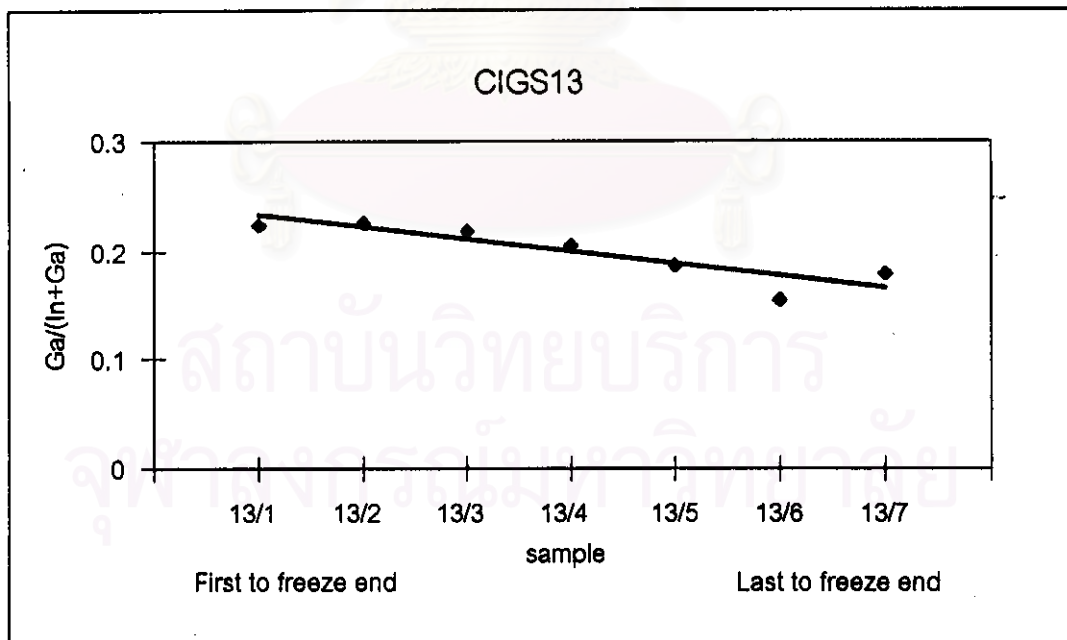
รูปที่ 6.32 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ $\text{Cu}/(\text{In}+\text{Ga})$ กับ ตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก



รูปที่ 6.33 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ กับ ตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก



รูปที่ 6.34 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ $\text{Cu}/(\text{In}+\text{Ga})$ กับ ตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก



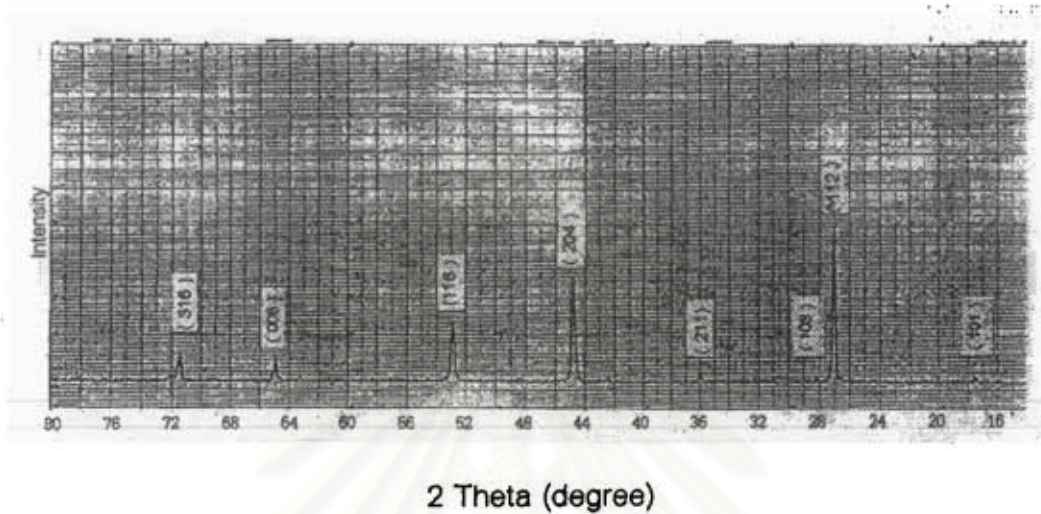
รูปที่ 6.35 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณ $\text{Ga}/(\text{In}+\text{Ga})$ กับ ตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก

ผลลัพธ์ของปริมาณสารที่ได้จากการวัดด้วยระบบ EDS ของผลึกสารกึ่งตัวนำ CIGS ทั้งห้าแห่งได้สรุปรวมไว้ในตารางที่ 6.1 ซึ่งแสดงค่าอัตราส่วนของ $\text{Cu}/(\text{Ga}+\text{In})$, $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ และ Met/Se ของผลึก CIGS ทั้งห้าแห่งที่ปลูกขึ้นด้วยวิธีการต่างๆ กัน ถ้าพิจารณาค่าอัตราส่วนของ $\text{Cu}/(\text{Ga}+\text{In})$ และ $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ ของแท่งผลึกที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ค่าอัตราส่วนของ $\text{Cu}/(\text{Ga}+\text{In})$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก ส่วนที่เย็นก่อน (first to freeze end) ไปยัง ส่วนที่เย็นหลัง (last to freeze end) ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้ เฟสเชิงคู่เทียม (pseudobinary phase diagram) สำหรับระบบของ $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{In}_2\text{Se}_3$ และ $\text{Cu}_2\text{Se} - \text{Ga}_2\text{Se}_3$ โดยจุดหลอมเหลวของ CuInSe_2 ประมาณ 987°C และ ของ CuGaSe_2 ประมาณ 1030°C พบว่าไม่สามารถจะหลอมรวมกันได้ที่ส่วนประกอบปริมาณ สัมพันธ์ (stoichiometry) และค่าสูงสุดของเส้นหลอมเหลว (Liquid line) ของทั้งคู่ จะอยู่ทางด้าน Cu_2Se poor ของเฟสเชิงคู่เทียม เมื่อพิจารณาตามเส้นหลอมเหลว จะเห็นว่าจุดหลอมเหลวจะเปลี่ยนแปลงจากน้อยไปหามาก เมื่อมีปริมาณของ Cu จากมากไปหาน้อย ซึ่งก็หมายความว่าที่จุดที่เย็นก่อนจะต้องมี Cu น้อยเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงจึงเกิดเป็นผลึกก่อนจุดอื่นๆ ซึ่งเมื่อคิดตามแนวการเย็นตัวของแท่งผลึกก็จะได้ว่าปริมาณ Cu จะมากขึ้นเรื่อยๆ จากปลายที่เย็นก่อนไปหาปลายที่เย็นหลัง

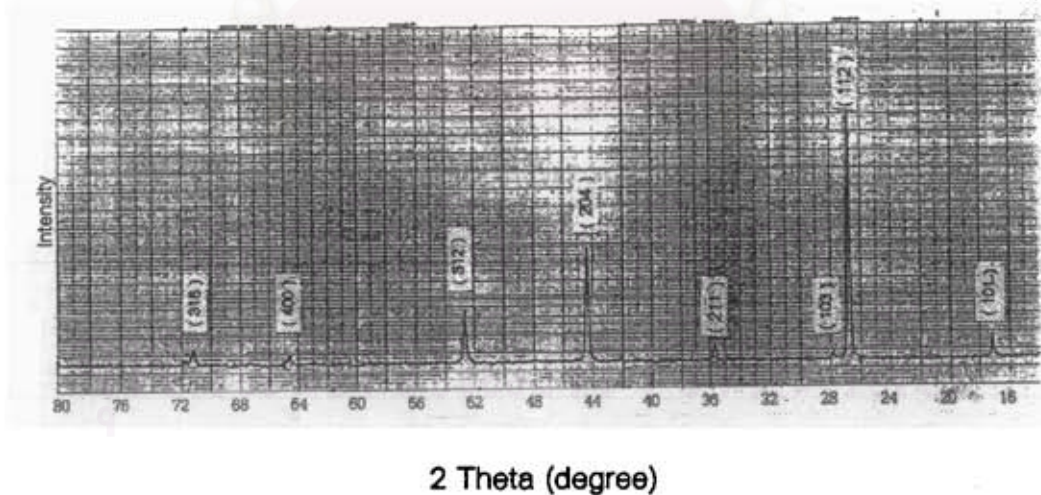
ในทำนองเดียวกันถ้าพิจารณาอัตราส่วนของ $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ ของแท่งผลึกที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ค่าอัตราส่วน $\text{Ga}/(\text{Ga}+\text{In})$ จะมีค่าลดลงจากจุดที่เย็นก่อน ไปยัง จุดที่เย็นหลัง เมื่อพิจารณาเส้นหลอมเหลวจะเห็นว่าเมื่อจุดหลอมเหลวเปลี่ยนแปลงจากน้อยไปหามาก เมื่อมีปริมาณของ Ga จากน้อยไปหามาก

6.2 ผลการศึกษาหาโครงสร้างผลึก CIGS

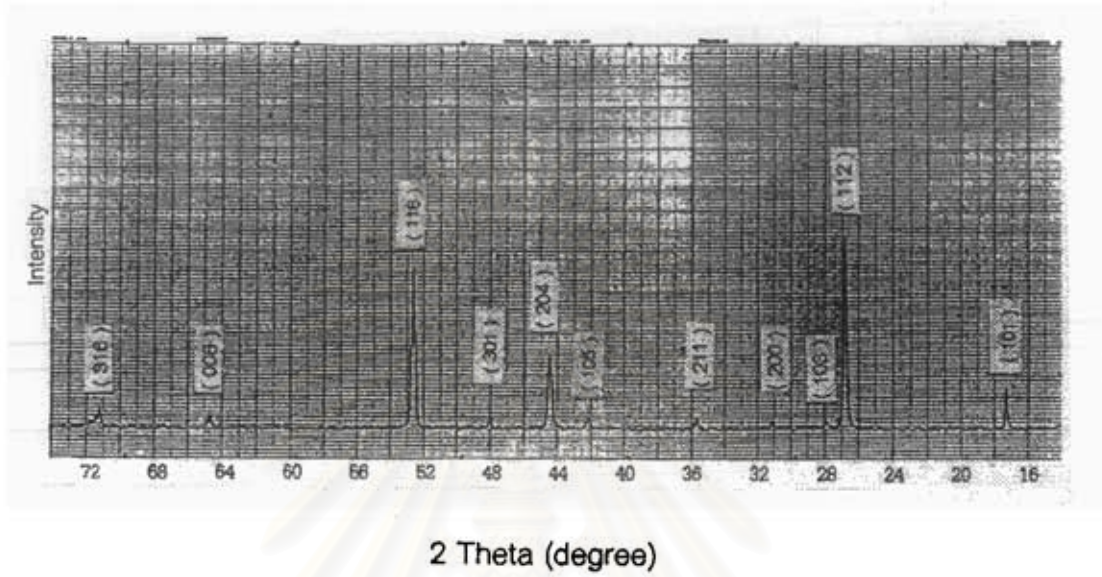
ผลึกสารกึ่งตัวนำ CIGS ที่เตรียมได้เป็นชั้นโตต้องนำเอาผลึกที่ปลูกได้นั้นมาบดให้ละเอียดเป็นผง แล้วนำไปใส่เข้าที่เตรียมไว้ในขั้นตอนการเตรียมผลึกเพื่อศึกษาหาลักษณะโครงสร้าง จากนั้นนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกมาจากระนาบต่างๆ ของผลึกในเข้าจะถูกบันทึกลงเป็นกราฟที่แปรกับค่ามุมสะท้อน (2θ) ดังภาพที่เรี้นต่อไปนี้



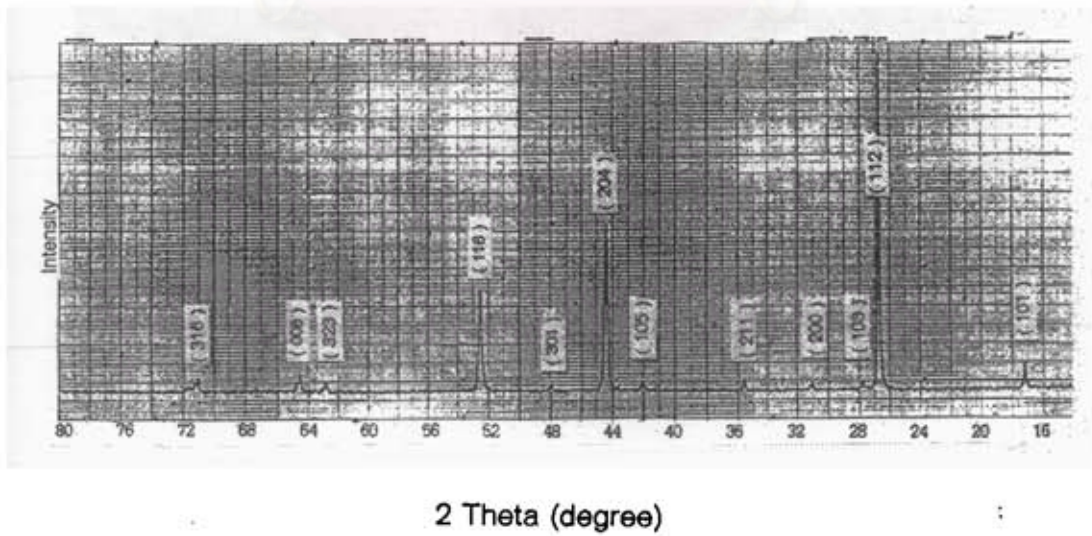
รูปที่ 6.36 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 3/1



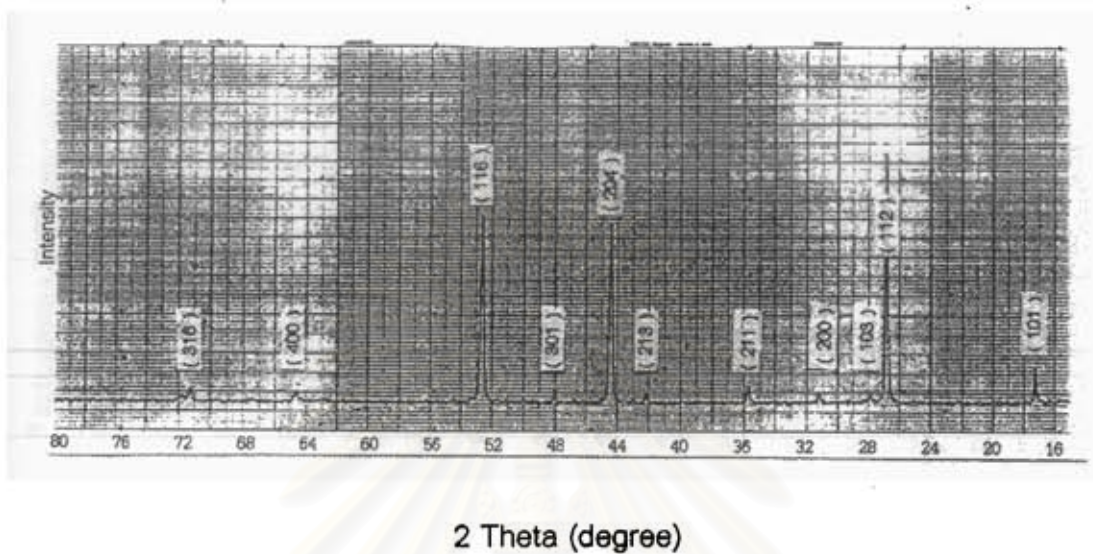
รูปที่ 6.37 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 3/4



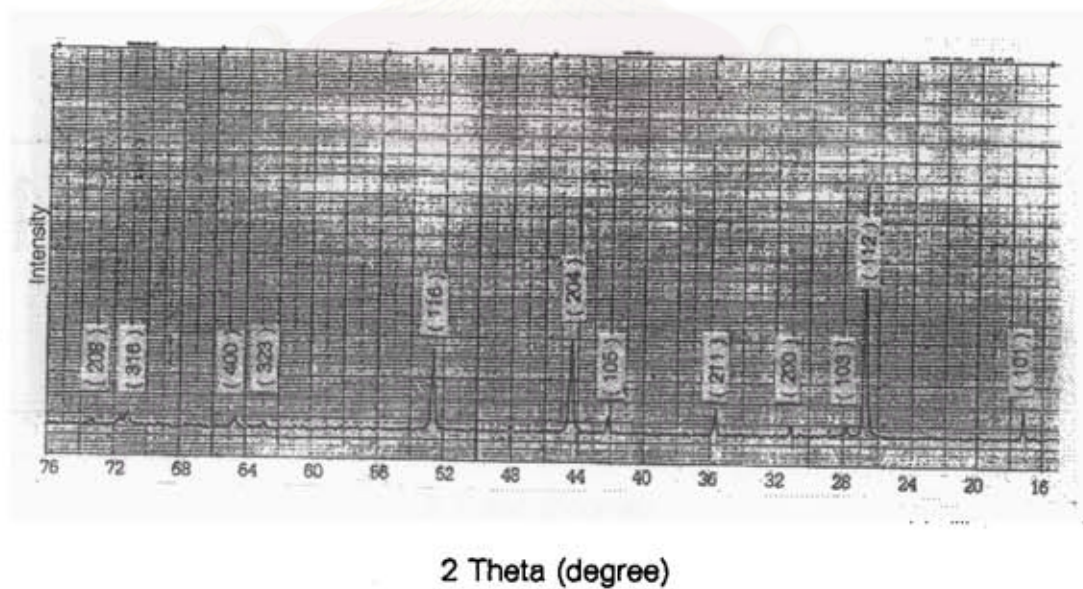
รูปที่ 6.38 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 3/5



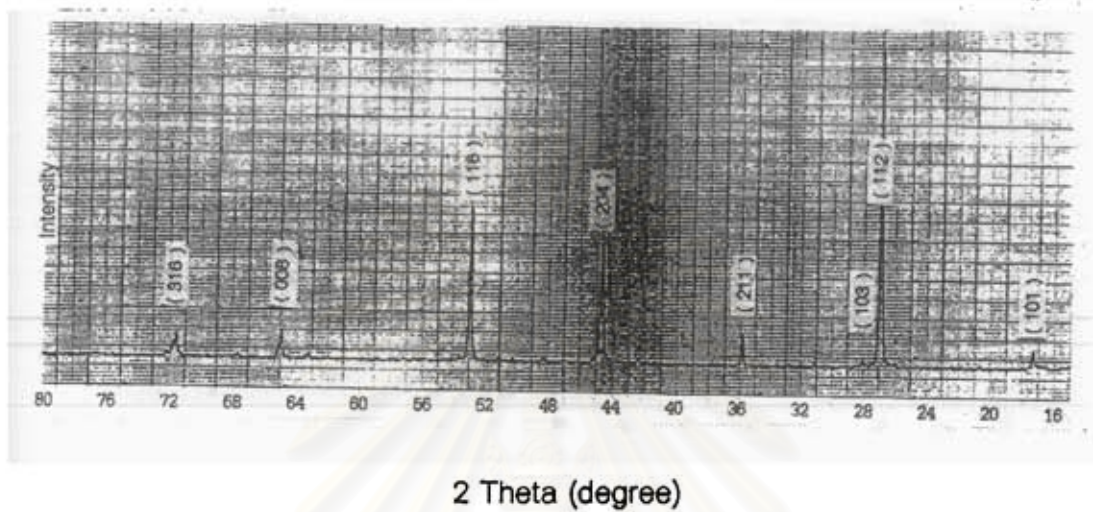
รูปที่ 6.39 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 3/6



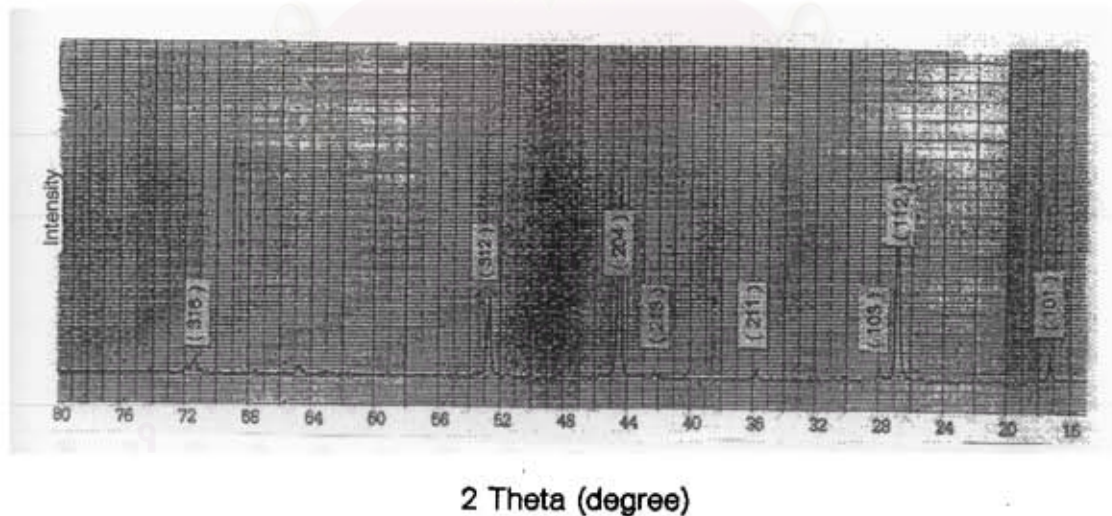
รูปที่ 6.40 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 3/10



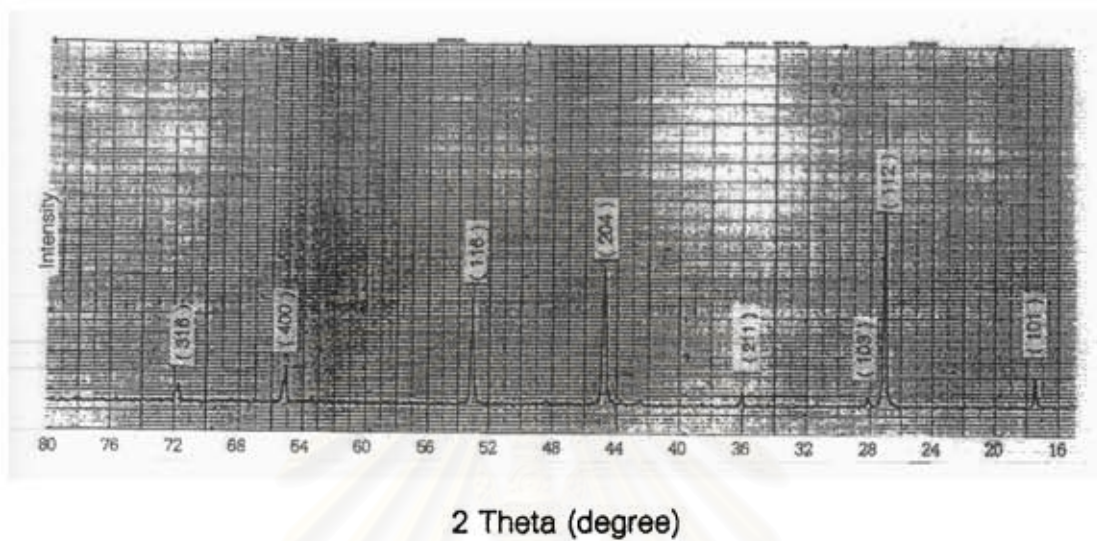
รูปที่ 6.41 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 3/11



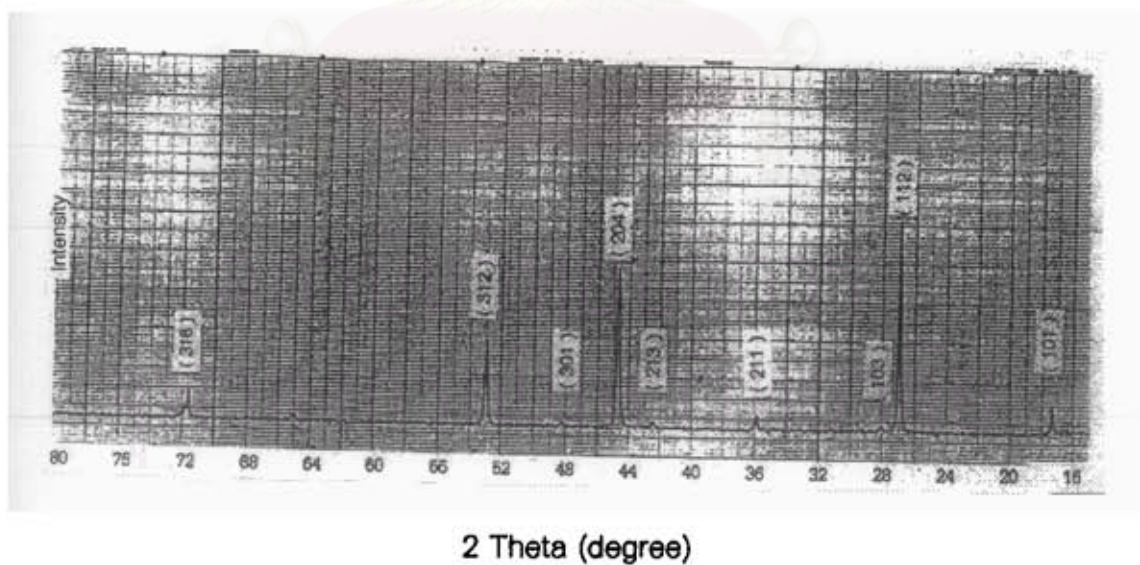
รูปที่ 6.42 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 10/F



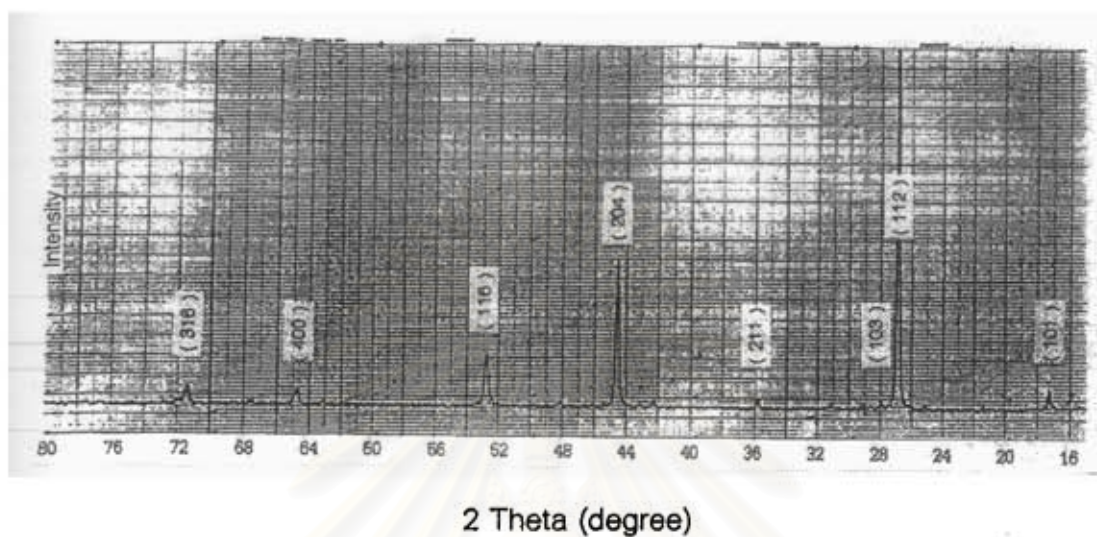
รูปที่ 6.43 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 10/L



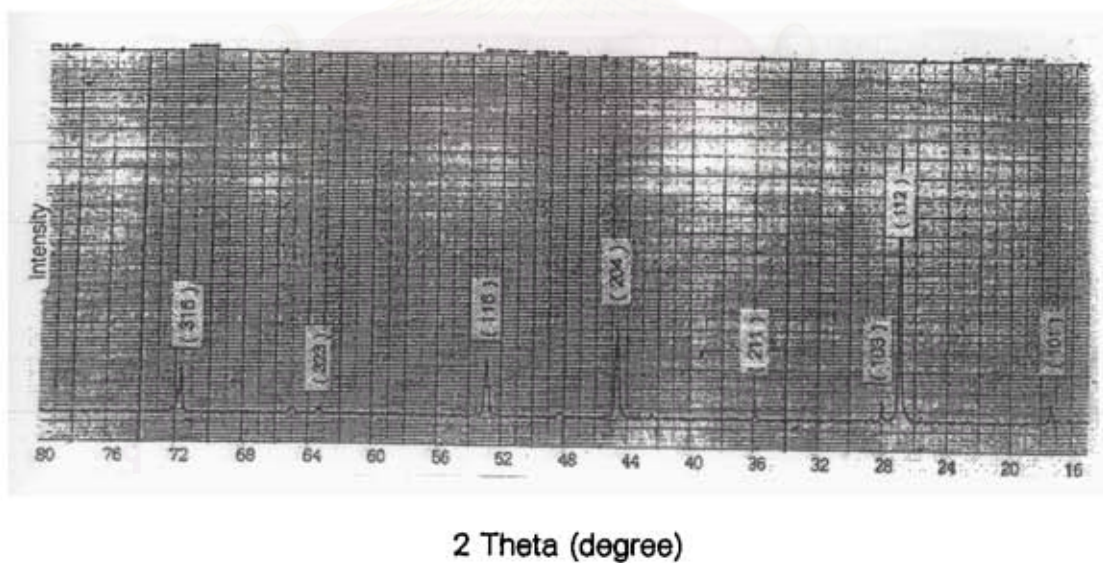
รูปที่ 6.44 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 12/F



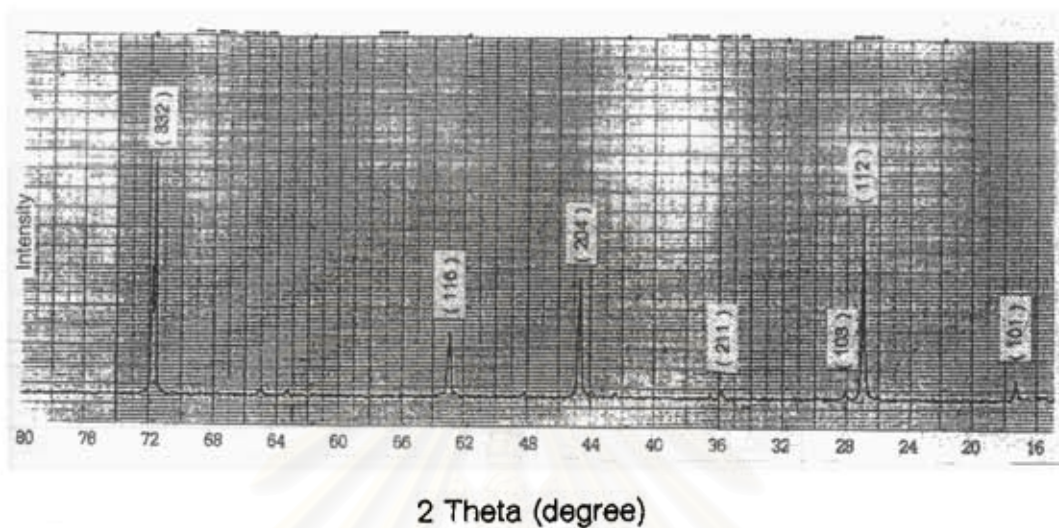
รูปที่ 6.45 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 12/M



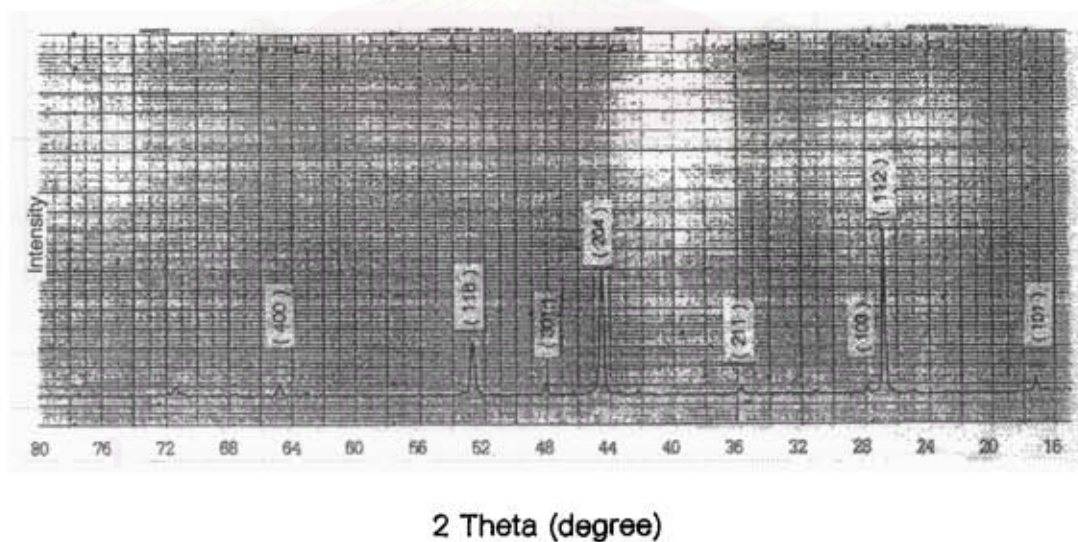
รูปที่ 6.46 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 12/L



รูปที่ 6.47 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 13/1



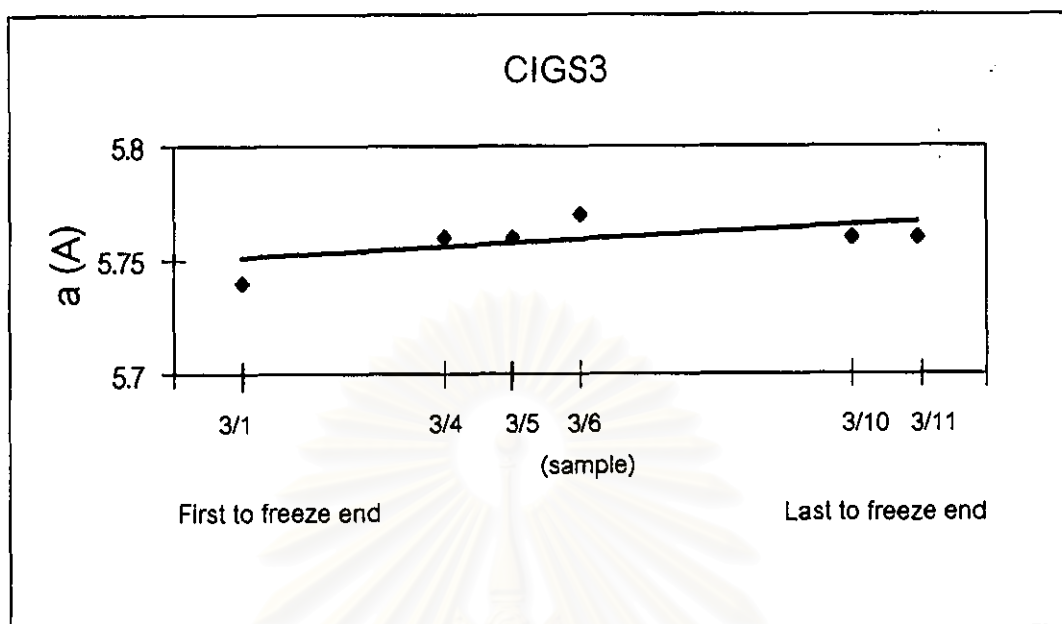
รูปที่ 6.48 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 13/4



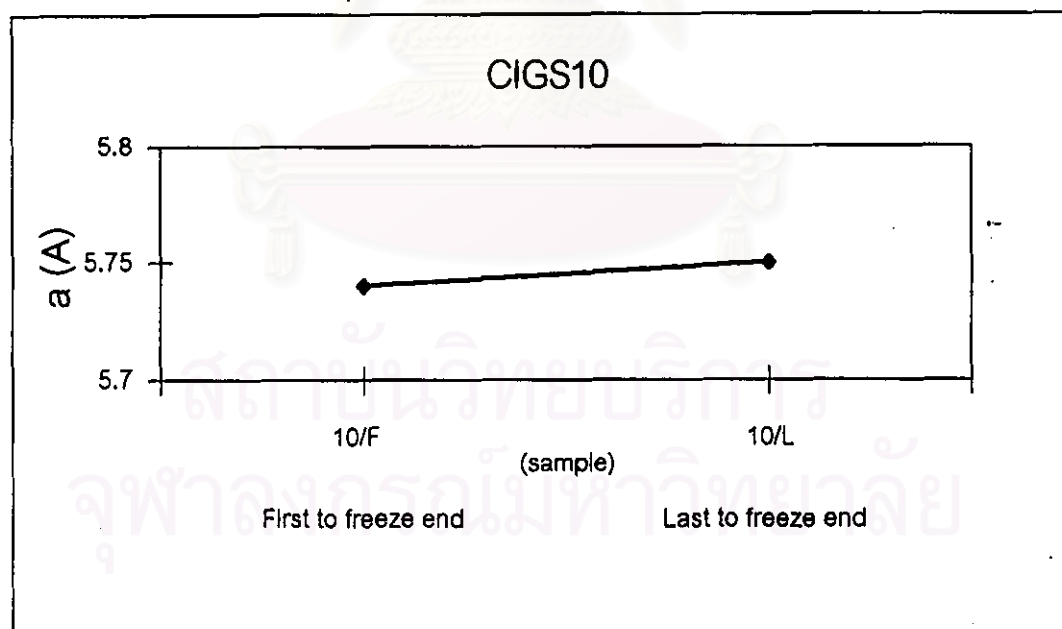
รูปที่ 6.49 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ CIGS 13/7

ตาราง 6.2 แสดงค่า Lattice constant

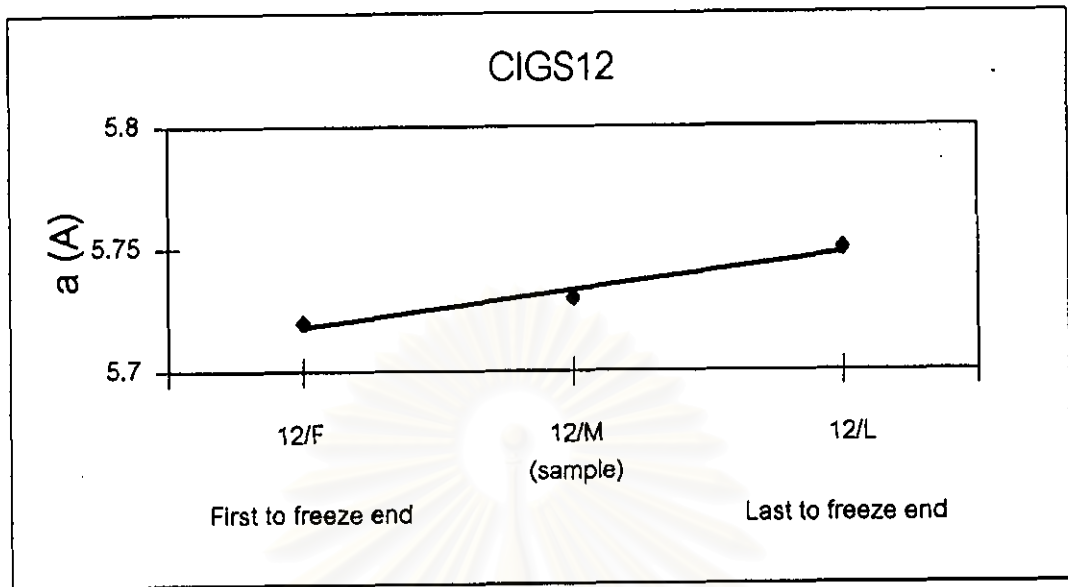
sample	a (Å)	c (Å)	c/a
3/1	5.748	11.483	1.998
3/4	5.761	11.550	2.005
3/5	5.757	11.515	2.000
3/6	5.771	11.537	1.999
3/10	5.757	11.526	2.002
3/11	5.762	11.545	2.004
10/F	5.737	11.476	2.000
10/L	5.747	11.541	2.008
12/F	5.720	11.465	2.004
12/M	5.730	11.482	2.004
12/L	5.749	11.504	2.001
13/1	5.735	11.479	2.002
13/4	5.736	11.474	2.000
13/7	5.752	11.489	1.997



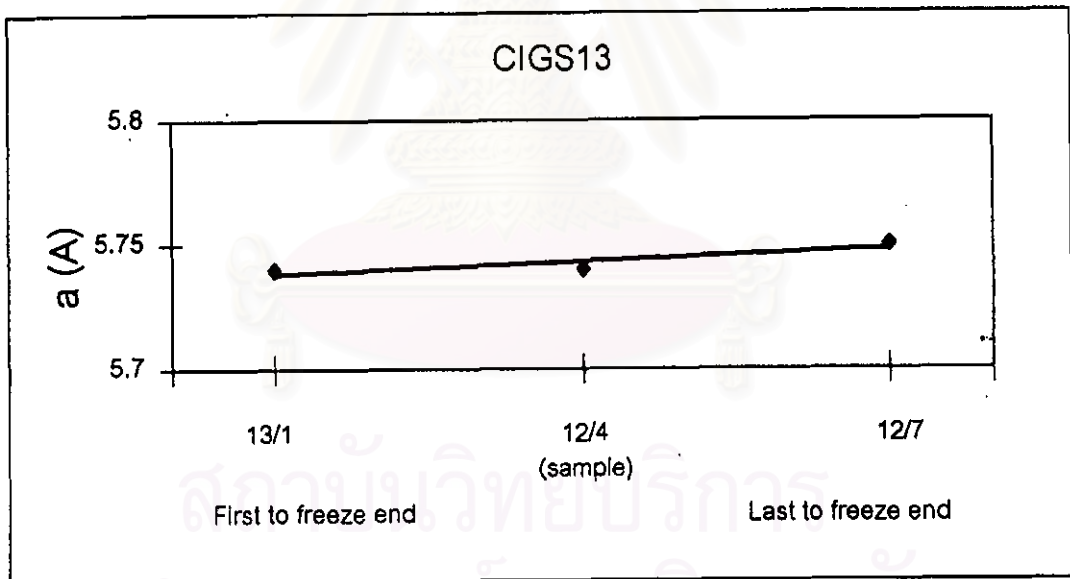
รูปที่ 6.50 กราฟความสัมพันธ์ Lattice constant กับตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก



รูปที่ 6.51 กราฟความสัมพันธ์ Lattice constant กับตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก



รูปที่ 6.52 กราฟความสัมพันธ์ Lattice constant กับตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก



รูปที่ 6.53 กราฟความสัมพันธ์ Lattice constant กับตำแหน่งการเย็นตัวของผลึก

ในการคำนวณหาโครงสร้างของผลึก CIGS ค่า Lattice constant a และ c จากผลการทดลอง ค่า a และ c จะมีค่ามากขึ้นจาก ด้านปลายที่เย็นก่อน (first to freeze end) ไปยังปลายที่เย็นหลัง (last to freeze end) ของผลึกที่ปลูกได้ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อพิจารณาค่าของ a และ c กับปริมาณของ Ga จะได้ว่า ค่า a และ c จะมีค่าน้อยลงเมื่อปริมาณของ Ga มากขึ้น เนื่องจากขนาดอะตอมของ Ga น้อยกว่าขนาดอะตอมของ In

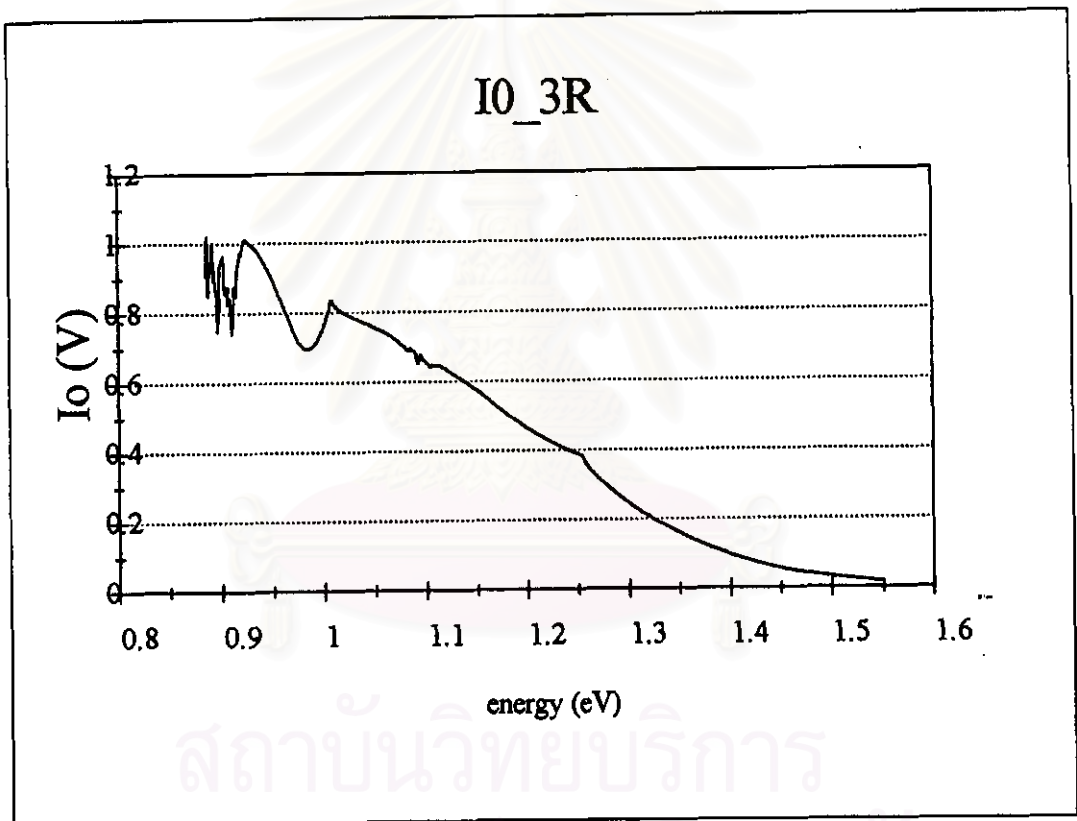
ตารางที่ 6.3 ผลเปรียบเทียบค่า Ga/(Ga+In) ที่ได้จากการวัดด้วย EDS กับค่าที่ได้จากการคำนวณตามสมการ 2.17

sample	a (A)	คำนวณจากสมการ 2.17	จาก EDS	ผลต่าง
		Ga/(Ga+In)	Ga/(Ga+In)	
3/1	5.748	0.19	0.12	0.07
3/4	5.761	0.12	0.10	0.02
3/5	5.757	0.14	0.10	0.04
3/6	5.771	0.06	0.09	0.03
3/10	5.757	0.14	0.09	0.05
3/11	5.762	0.11	0.09	0.02
10/F	5.737	0.25	0.22	0.03
10/L	5.747	0.20	0.15	0.05
12/F	5.720	0.35	0.22	0.13
12/M	5.730	0.29	0.21	0.08
12/L	5.749	0.18	0.16	0.02
13/1	5.735	0.27	0.22	0.05
13/4	5.736	0.26	0.21	0.05
13/7	5.752	0.17	0.18	0.10

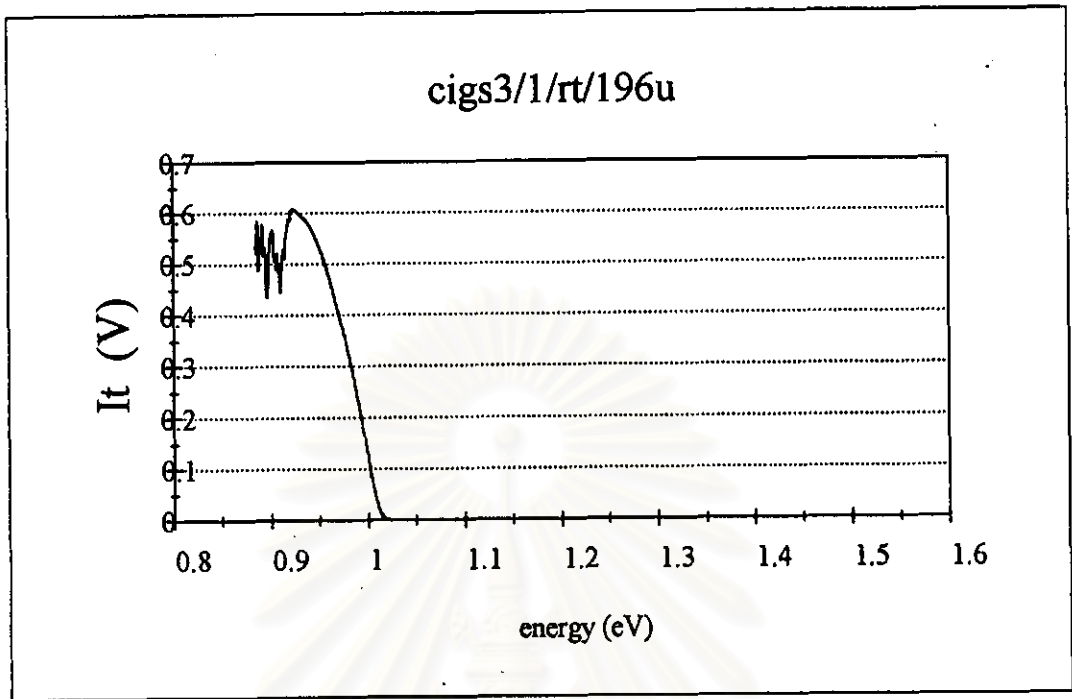
ผลที่ได้ทั้งสองวิธีมีปริมาณสัดส่วน Ga/(Ga+In) ต่างกันอยู่ประมาณ 0.047 โดยปริมาณ Ga จะมากที่ปลายผลึกที่เย็นก่อน (first to freeze end) และมีปริมาณลดลงไปหาปลายที่เย็นหลัง (last to freeze end) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ W.W. Lam , I. Shin [27] ที่ใช้วิธีการเตรียมผลึกแบบ horizontal Bridgman เหมือนกัน

6.3 ผลการศึกษาสมบัติเชิงแสงของ CIGS

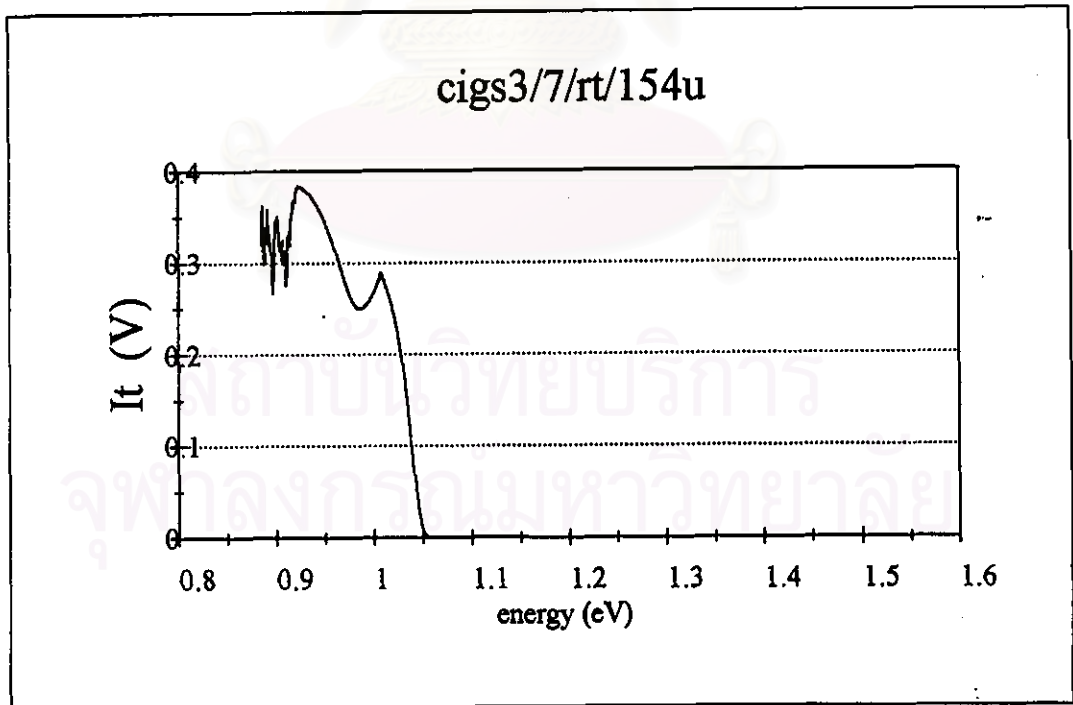
การวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของผลึก CIGS โดยทำการวัดในช่วงความยาวคลื่น 8000 ถึง 14000 อังค์สตรอม โดยใช้หัววัดแบบเจอร์มาเนียม (Ge) ซึ่งสามารถตอบสนองได้ดีในช่วงความยาวคลื่นใกล้แสงใต้แดง (near infrared) แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดทังสเตนเฮไลม์ สัญญาณที่ทำการวัดจะเป็นสัญญาณของความเข้มของแสงที่ตกกระทบบนผลึก CIGS (I_0) และ สัญญาณความเข้มแสงที่ทะลุผ่านผลึก CIGS (I_1) โดยลักษณะสัญญาณที่วัดได้จะเป็นดังนี้



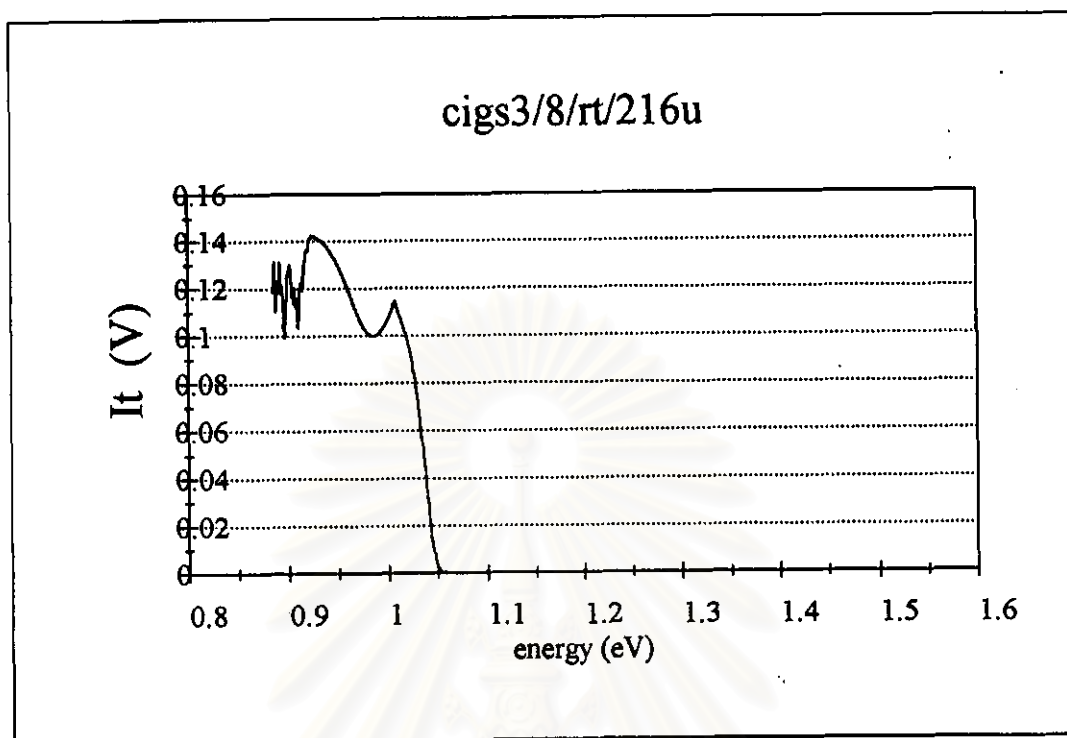
รูปที่ 6.54 กราฟของสัญญาณแสงตกกระทบบนผลึก I_0



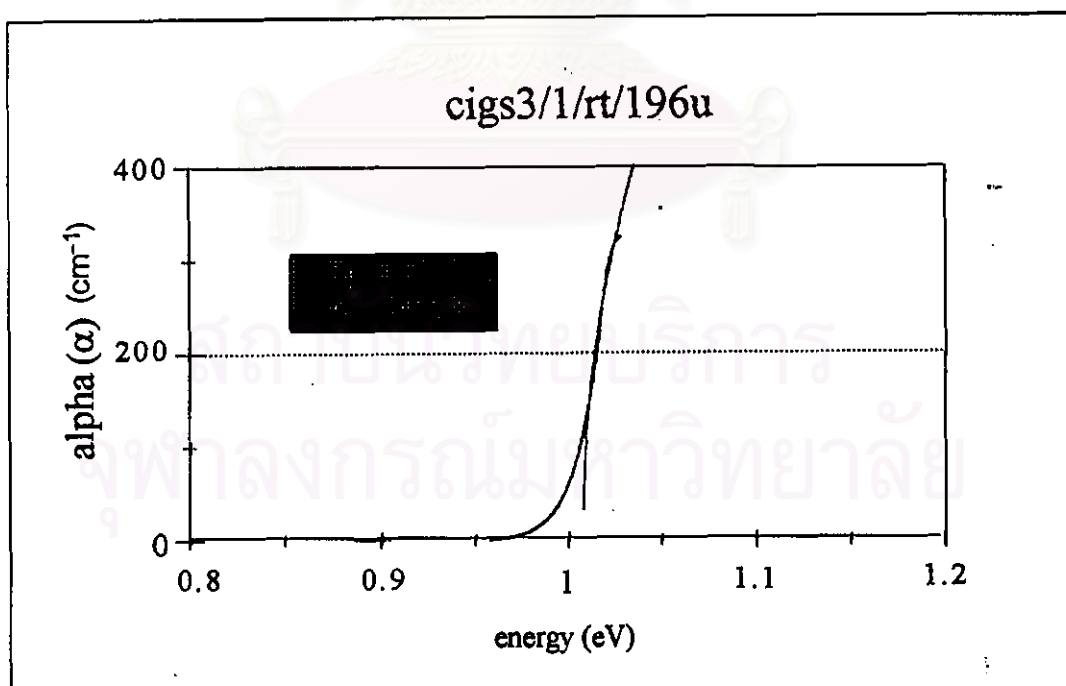
รูปที่ 6.55 กราฟสัญญาณแสงที่ทะลุผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/1 ที่อุณหภูมิห้อง



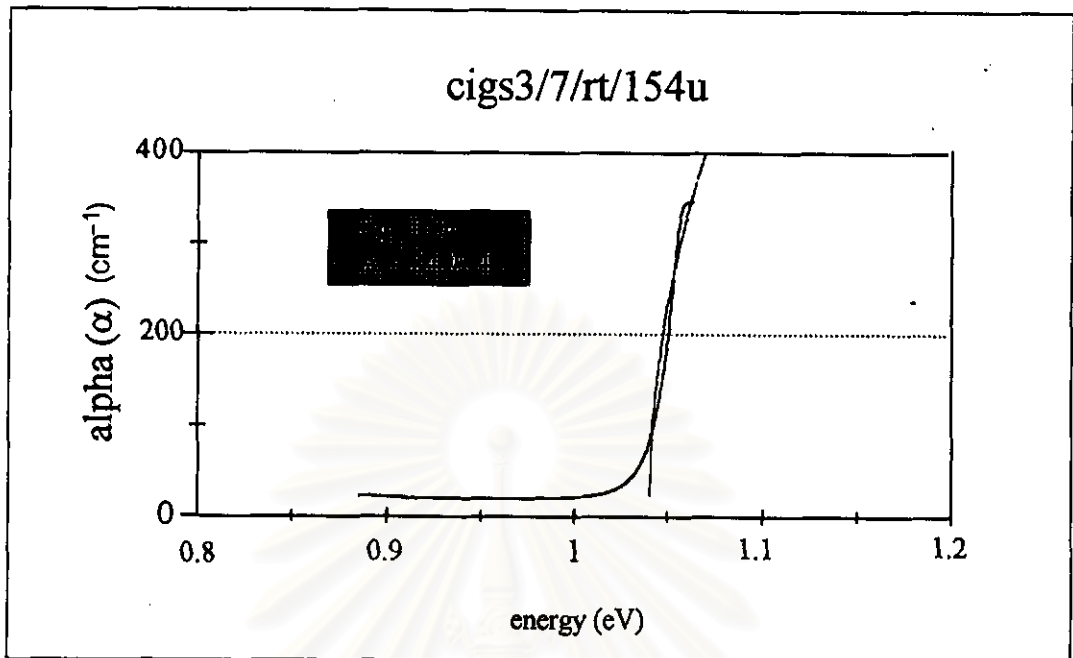
รูปที่ 6.56 กราฟสัญญาณแสงที่ทะลุผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/7 ที่อุณหภูมิห้อง



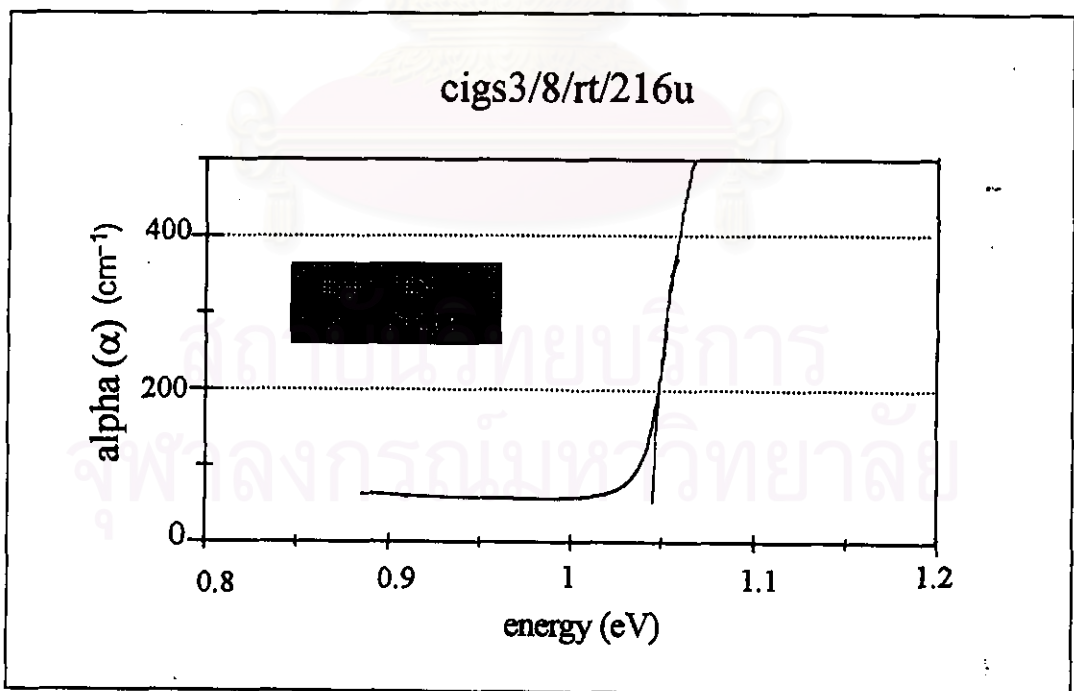
รูปที่ 6.57 กราฟสัญญาณแสงที่ทะลุผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/8 ที่อุณหภูมิห้อง



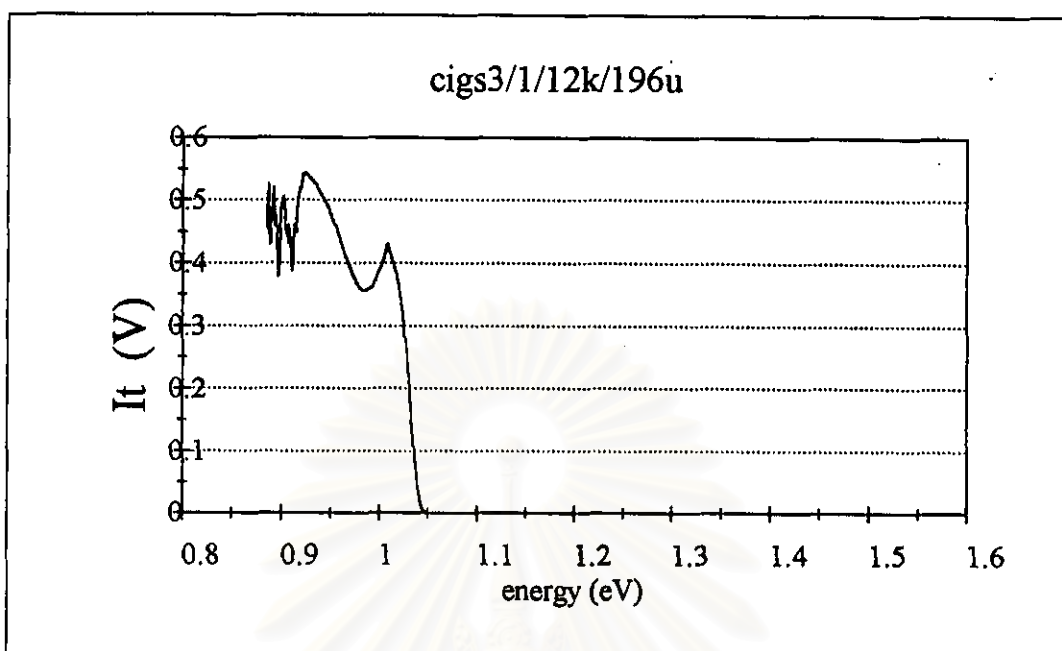
รูปที่ 6.58 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและช่องว่างแถบพลังงาน
ของผลึก CIGS3/1 ที่อุณหภูมิห้อง



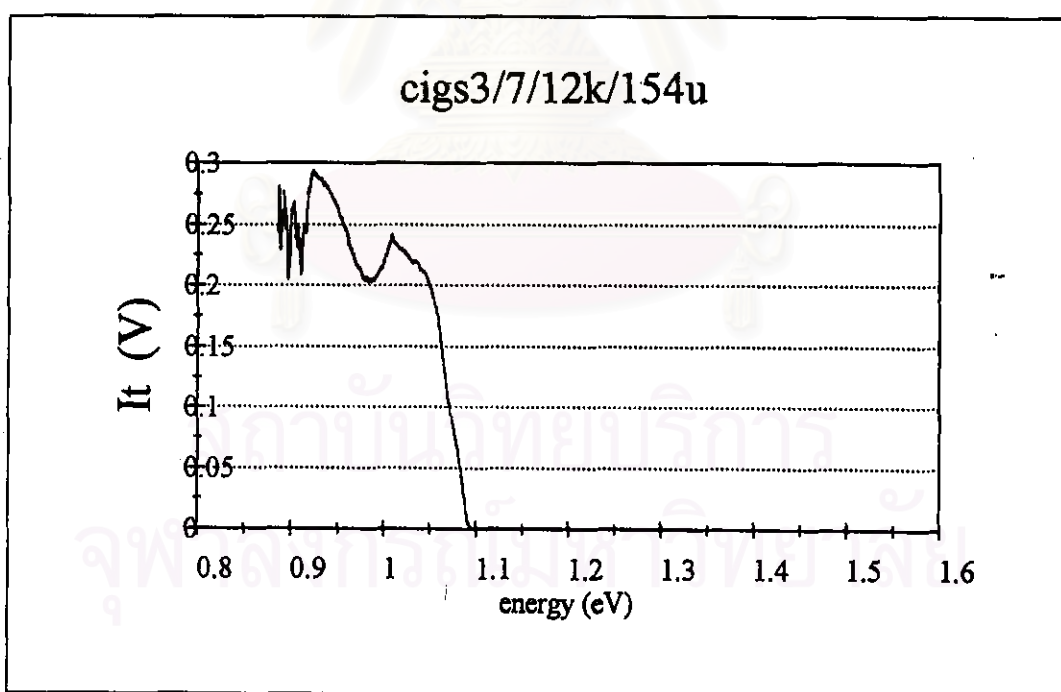
รูปที่ 6.59 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและช่องว่างแถบพลังงาน
ของผลึก CIGS3/7 ที่อุณหภูมิห้อง



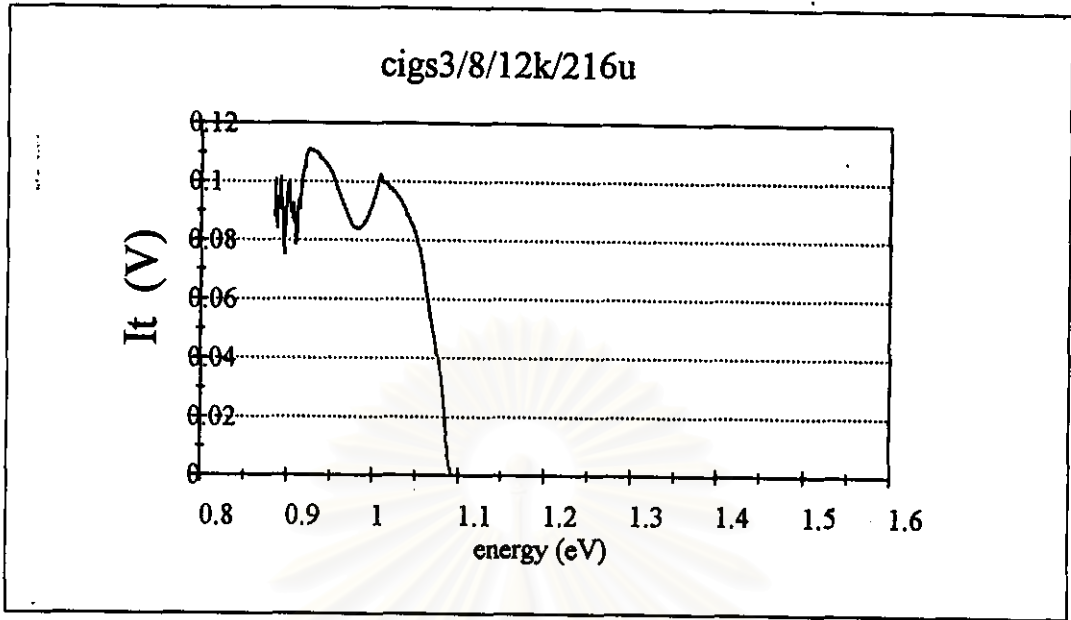
รูปที่ 6.60 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและช่องว่างแถบพลังงาน
ของผลึก CIGS3/8 ที่อุณหภูมิห้อง



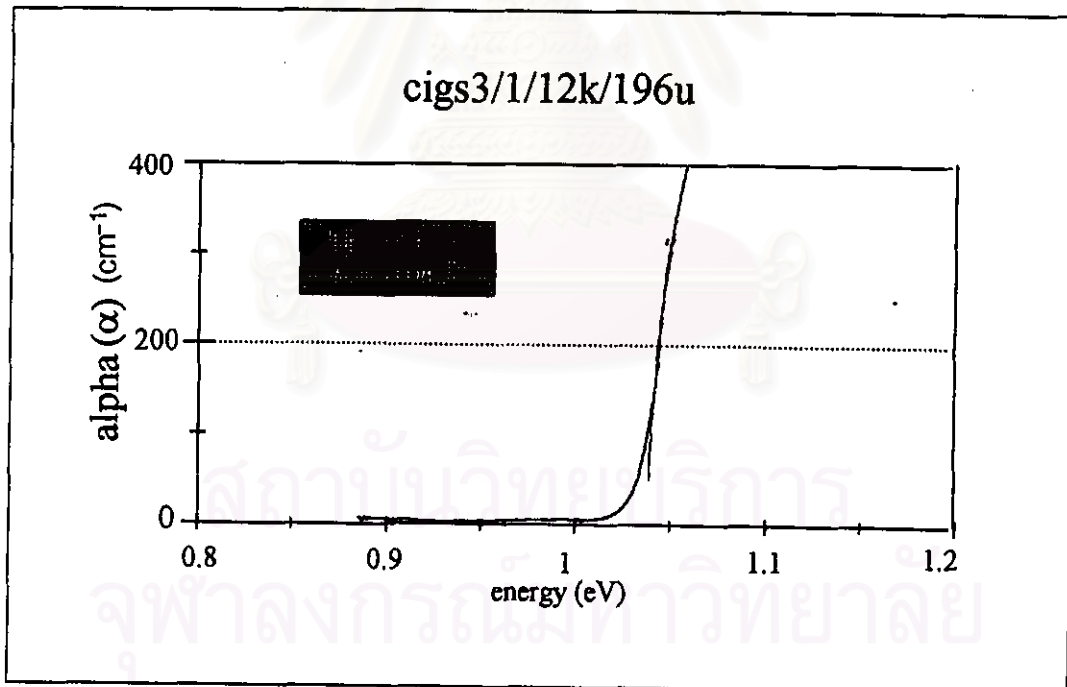
รูปที่ 6.61 กราฟสัญญาณแสงที่ทะลุผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/1 ที่อุณหภูมิ 12K



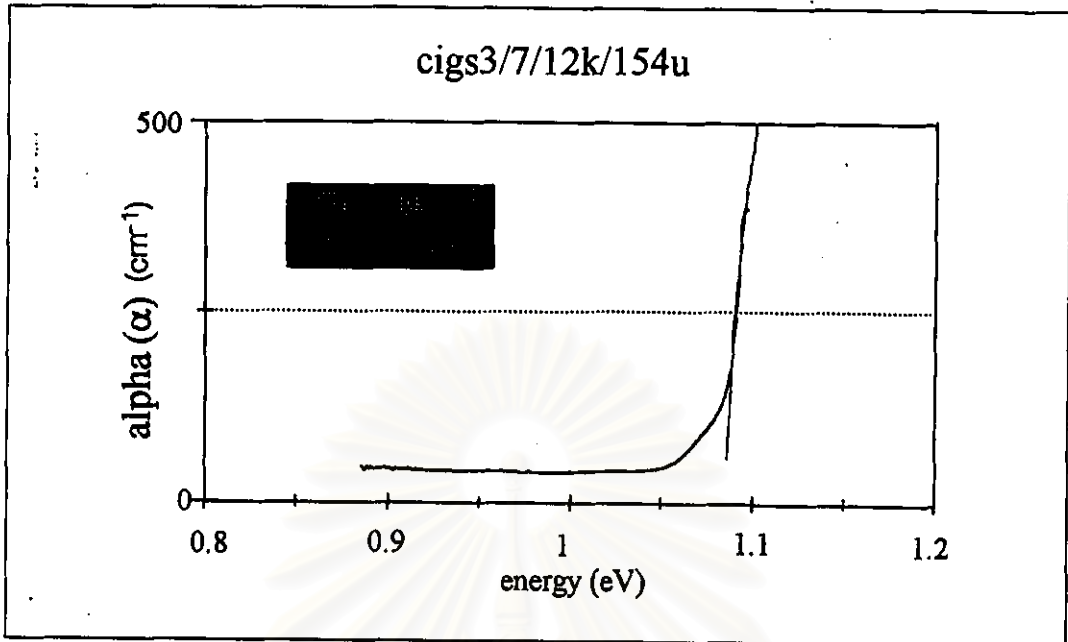
รูปที่ 6.62 กราฟสัญญาณแสงที่ทะลุผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/7 ที่อุณหภูมิ 12K



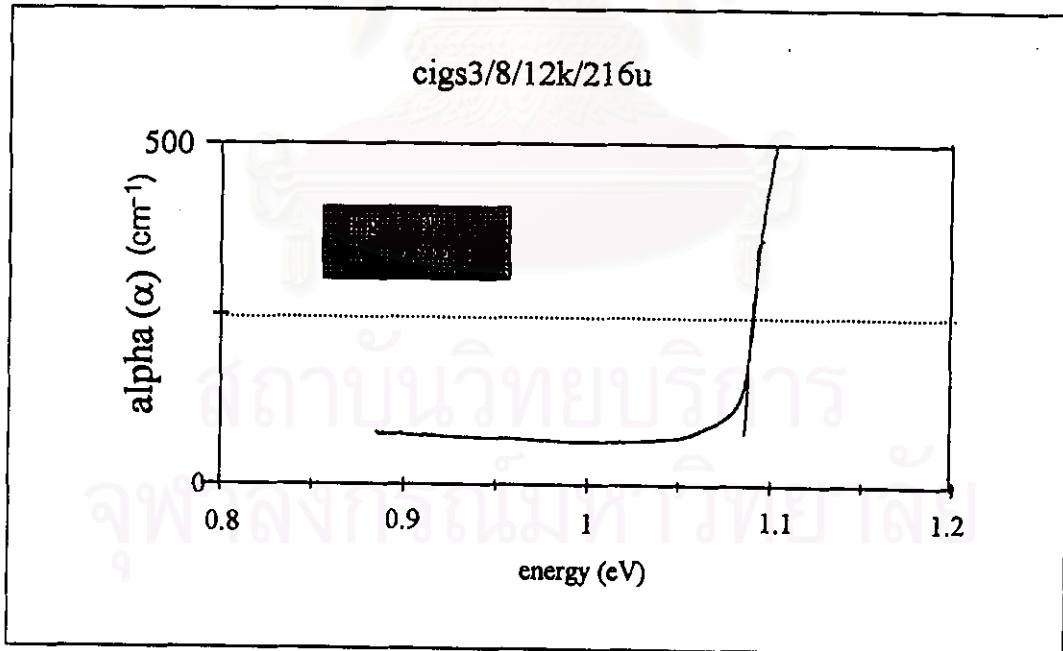
รูปที่ 6.63 กราฟสัญญาณแสงที่ทะลุผ่าน (I_t) ผลึก CIGS3/8 ที่อุณหภูมิ 12K



รูปที่ 6.64 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและช่องว่างแถบพลังงาน
ของผลึก CIGS3/1 ที่อุณหภูมิ 12K



รูปที่ 6.65 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและช่องว่างแถบพลังงาน
ของผลึก CIGS3/7 ที่อุณหภูมิ 12K



รูปที่ 6.66 กราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและช่องว่างแถบพลังงาน
ของผลึก CIGS3/8 ที่อุณหภูมิ 12K

ผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของสารกึ่งตัวนำ CIGS ที่ทำการปลูกได้ วัดที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่ามากกว่าที่วัดที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำขอบของช่องว่างแถบพลังงานคมชัดไม่เป็นเส้นเบรอะเพราะพาทะที่อยู่ใกล้เส้นแถบพลังงานนี้ไม่ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานความร้อนจึงทำให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่ามาก จากค่า E_g ที่ได้ เมื่อเทียบกับผลการทดลองของ T. Yamaguchi [31] จะเห็นว่า E_g ของ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ x มีค่าประมาณ 0.1 จะมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.04 แต่มีบางตัวอย่างค่าที่วัดได้มีค่าน้อยไป ซึ่งค่าของช่องว่างแถบพลังงานที่วัดได้มีค่าน้อยเกินไปจากค่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่เหนือช่องว่างแถบพลังงานที่วัดได้น้อยเกินไป (ควรจะมากกว่า 1000 ขึ้นไป) ซึ่งโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า E_g จะต้องไม่ทะลุผ่านไปได้ โดยโฟตอนที่จุดนั้น ควรจะถูกดูดกลืนหมดแต่มีบางส่วนที่หัววัด วัดได้ คาดว่าน่าจะมาจากขบวนการ photoluminescence ซึ่งจะส่งผลให้ค่า E_g ที่ได้ออกมาจะมีค่าน้อยกว่าค่าจริงมากเนื่องจากเราไม่สามารถวัดที่ระดับพลังงานโฟตอนใกล้กับ E_g ได้ การที่จะให้ได้ค่าวัดการดูดกลืนที่ถูกต้อง และใกล้เคียงกับทฤษฎีจะต้อง ใช้การขีดให้ตัวอย่างที่จะทำการวัดบางมาก ๆ ให้อยู่ในระดับประมาณน้อยกว่า 10 ไมครอน เนื่องจาก αd จะต้องอยู่ในระดับประมาณ 1 การวัดถึงจะได้ผลถูกต้อง ซึ่งจะทำให้สมการ $I = I_0 e^{-\alpha d}$ เปลี่ยนแปลงเห็นได้ชัดเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า ของ CIGS

6.4.1 การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีชี้ความร้อน (hot probe method)

การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ทำการปลูกทั้งห้าหลอดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เนื่องจากเข็มของโวลต์มิเตอร์จะชี้ไปทางลบซึ่งเป็นผลมาจากโฮลที่เป็นพาหะข้างมากเมื่อได้รับพลังงานความร้อนจะแพร่กระจายมายัง ขั้วที่เย็นกว่า โดยผลที่ได้จะแสดงในตาราง 6.4

ผลึกสารกึ่งตัวนำ	ชนิดการนำไฟฟ้า
CIGS 3/2	P
CIGS 3/4	P
CIGS 3/5	P
CIGS 3/6	P
CIGS 3/7	P
CIGS 3/8	P
CIGS 3/9	P
CIGS 3/10	P
CIGS 3/11	P
CIGS 10/L	P
CIGS 11/L	P
CIGS 12/F	P
CIGS 12/M	P
CIGS 12/L	P
CIGS 13/F	P
CIGS 13/M	P
CIGS 13/L	P

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยวิธีชี้ความร้อน

จากตารางชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเป็นแบบชนิดพี ซึ่งจะได้ว่าวิธีการปลูกผลึกคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมโตลีนไนด์ ($\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$) ที่ x มีค่าประมาณ 0.2 โดยวิธีการเตรียมแบบโตเวกซ์ลนัล ฟริชชิง ของ บริคจ์แมน แบบแนวนอน ผลึกที่ได้จะมีการนำไฟฟ้าแบบชนิดพี ซึ่งเหมือนกับผลการทดลองของ W.W. Lam , I. Shin [27]

6.4.2 ผลการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าวิธีแวนเดอเพอร์ และสภาพเคลื่อนที่ได้ด้วยระบบฮอลล์

ในครั้งนี้อผลึกจะถูกนำมาทำการวัด เฉพาะส่วนที่สามารถเตรียมได้สำหรับการวัดสมบัติเชิงไฟฟ้า ส่วนที่ไม่สามารถเตรียมเพื่อทำการวัดจะเป็นส่วนที่มีสภาพผลึกแตกหักมากไม่สามารถขัดให้เป็นชิ้นที่เหมาะสมสำหรับการวัดได้ซึ่งผลการวัดจะแสดงในตาราง 6.5

ผลึกสารกึ่งตัวนำ	สภาพต้านทานไฟฟ้า (Ohm-cm)	สภาพเคลื่อนที่ได้ ของฮอลล์ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	ความหนาแน่นของ พาหะอิสระ ($1/\text{cm}^3$)
CIGS 3/2	0.61	25.2	4.07×10^{17}
CIGS 3/4	0.68	20.2	4.54×10^{17}
CIGS 3/5	0.53	20.0	5.87×10^{17}
CIGS 3/6	0.38	34.3	4.84×10^{17}
CIGS 3/7	0.29	51.7	4.21×10^{17}
CIGS 3/8	5.07	50.1	2.45×10^{16}
CIGS 3/9	6.26	45.6	2.19×10^{16}
CIGS 3/10	8.39	42.8	1.74×10^{16}
CIGS 3/11	13.1	48.5	9.79×10^{15}
CIGS 12/F	1.59	31.9	1.23×10^{17}
CIGS 12/M	1.08	21.3	2.70×10^{17}
CIGS 12/L	1.34	6.8	6.85×10^{17}
CIGS 13/F	1.08	37.3	1.55×10^{17}
CIGS 13/M	1.26	18.1	2.74×10^{17}
CIGS 13/L	1.68	33.3	1.12×10^{17}

ตาราง 6.5 แสดงค่าของ ρ , μ_H และ p ของผลึก CIGS วัดที่อุณหภูมิห้อง

จากทฤษฎีเกี่ยวกับไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำในบทที่ 4 อุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญที่กำหนดปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำที่มีสิ่งเจือปนอยู่ โดยช่วงที่อุณหภูมิต่ำ (Freeze - out region) ความหนาแน่นของพาหะอิสระจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ สำหรับช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Saturation region) ความหนาแน่นพาหะอิสระได้มาจากอะตอมของสิ่งเจือปนที่ถูกไอออไนซ์ทั้งหมดมีค่าคงที่ และในช่วงที่มีอุณหภูมิสูงๆ พาหะอิสระส่วนใหญ่เป็นของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกเอง และเพิ่มตามอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ตามสมการดังต่อไปนี้

ช่วงอุณหภูมิสูง

$$\begin{aligned} n_n &= n_i + \frac{1}{2}(N_D - N_A) \\ &= \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) + \frac{1}{2}(N_D - N_A) \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} p_p &= n_i + \frac{1}{2}(N_A - N_D) \\ &= \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) + \frac{1}{2}(N_A - N_D) \end{aligned} \quad (6.2)$$

ช่วงอุณหภูมิปานกลาง

$$n_n = N_D - N_A \quad (6.3)$$

$$p_p = N_A - N_D \quad (6.4)$$

ช่วงอุณหภูมิต่ำ

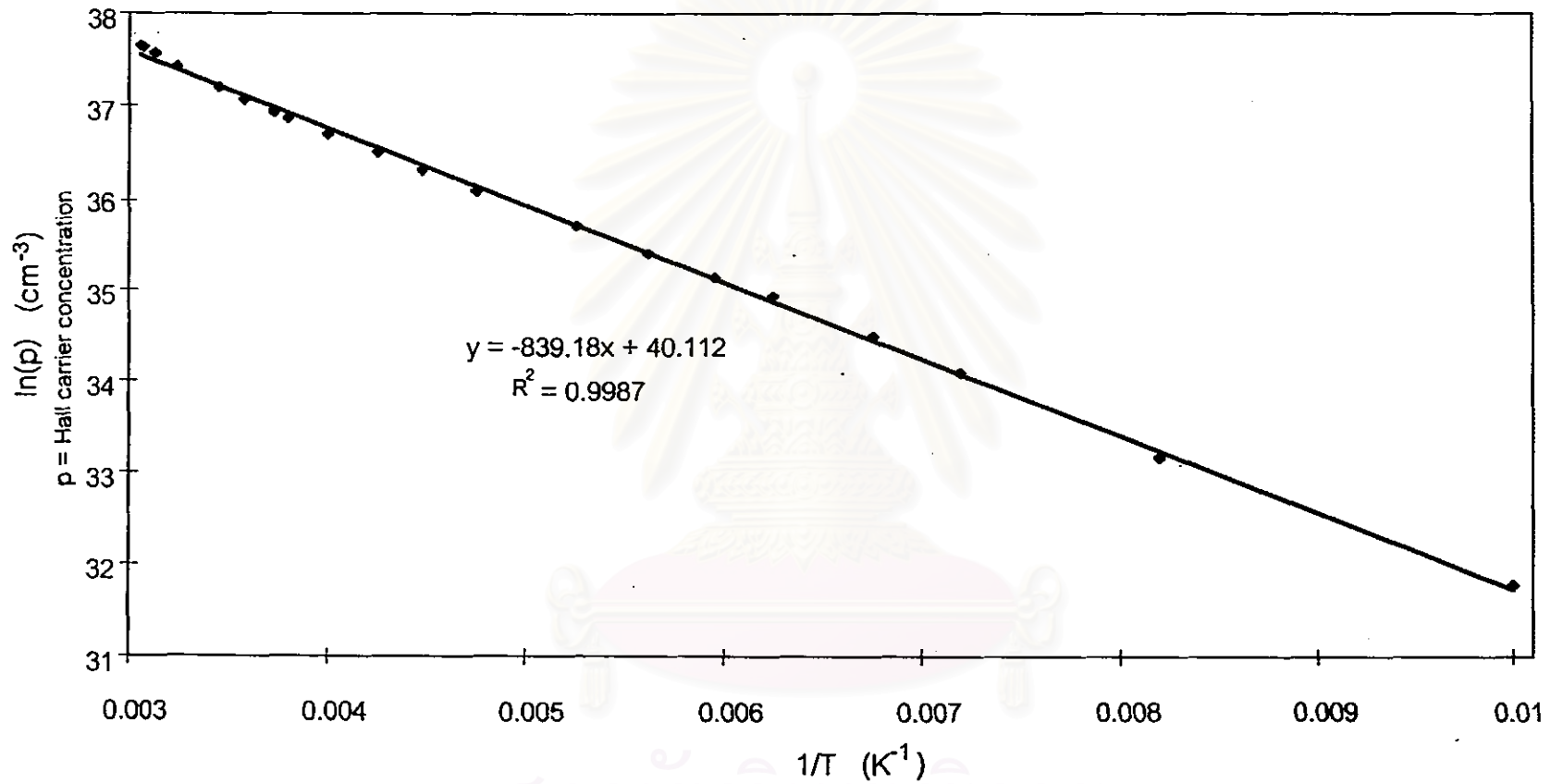
$$n = \frac{N_D - N_A}{2N_A} N_C \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (6.5)$$

$$p = \frac{N_A - N_D}{2N_D} N_V \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (6.6)$$

นำตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับการวัดฮอลล์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งประกอบด้วยแผ่นทองแดงหนาประกบกับแผ่นเบแคไลต์ แผ่นทองแดงมีหน้าที่นำความร้อนออกจากผลึกตัวอย่าง ซึ่งจะไปเสียบกับจุดติดผลึกภายในระบบฮอลล์ ผลการวัดแสดงตามตารางที่ 6.6

อุณหภูมิ (k)	ผลึกสารกึ่งตัวนำ CIGS 3/10		
	สภาพต้านทานไฟฟ้า (Ohm-cm)	สภาพเคลื่อนที่ได้ ของโฮลล์ ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	ความหนาแน่นของพาหะ อิสระ ($1/\text{cm}^3$)
100	775.91	128.5	6.26×10^{13}
122	209.26	117.8	2.53×10^{14}
139	92.41	105.8	6.38×10^{14}
148	68.23	96.2	9.51×10^{14}
160	45.13	93.1	1.48×10^{15}
168	40.28	86.3	1.80×10^{15}
178	31.54	84.4	2.34×10^{15}
190	25.41	77.8	3.16×10^{15}
210	18.87	71.5	4.62×10^{15}
223	16.19	66.7	5.78×10^{15}
235	14.33	62.5	6.97×10^{15}
250	12.54	58.1	8.57×10^{15}
263	11.33	54.2	1.02×10^{16}
268	10.92	52.6	1.09×10^{16}
279	9.94	50.6	1.24×10^{16}
289	9.25	47.4	1.42×10^{16}
308	8.01	43.7	1.78×10^{16}
319	7.37	41.1	2.06×10^{16}
325	7.08	39.9	2.21×10^{16}
327	7.04	39.7	2.23×10^{16}

ตาราง 6.6 แสดงค่าของ ρ , μ_H และ p ของผลึก CIGS วัดที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 6.67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะกับอุณหภูมิ

เมื่อนำข้อมูลของความหนาแน่นพาหะอิสระมาเขียนกราฟเทียบกับอุณหภูมิ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(p)$ กับ $1/T$ จะได้กราฟตามรูป 6.67 เมื่อพิจารณากราฟที่ได้ประกอบด้วยเส้นเอียงทางทฤษฎีที่เขียนไว้ในบทที่ 4 และเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.3 จะได้ว่ากราฟที่ได้เป็นช่วงฟรีซเอาท์ (Freeze out region) ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ น้อยกว่าความหนาแน่นของสิ่งเจือปนชนิดผู้รับ (N_A) เนื่องจากโอกาสที่โฮลจะถูกไอออไนซ์ด้วยพลังงานความร้อน (kT) มีน้อยมาก และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์จะมากขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ โดยในการปลูกผลึกครั้งนี้ผลึกที่ได้จะมีทั้งสิ่งเจือปนชนิดผู้รับ (N_A) และสิ่งเจือปนชนิดผู้ให้ (N_D) แต่จะมีปริมาณสิ่งเจือปนชนิดผู้รับมากกว่า ($N_A > N_D$) ดังนั้นในการคำนวณและพิตจึงต้องใช้สมการ

$$p = \frac{N_A - N_D}{2N_D} N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

$$\ln(p) = -\frac{E_g}{kT} + \text{constant}$$

จากการพิตจะได้ความชันเส้นกราฟ มีค่าเท่ากับ -839.18 ดังแสดงในรูปที่ 6.67 จากค่าความชันนี้สามารถคำนวณหาค่าพลังงานของผู้รับ ($E_g = E_A - E_V$) ได้

$$E_g = 839.18 \times k$$

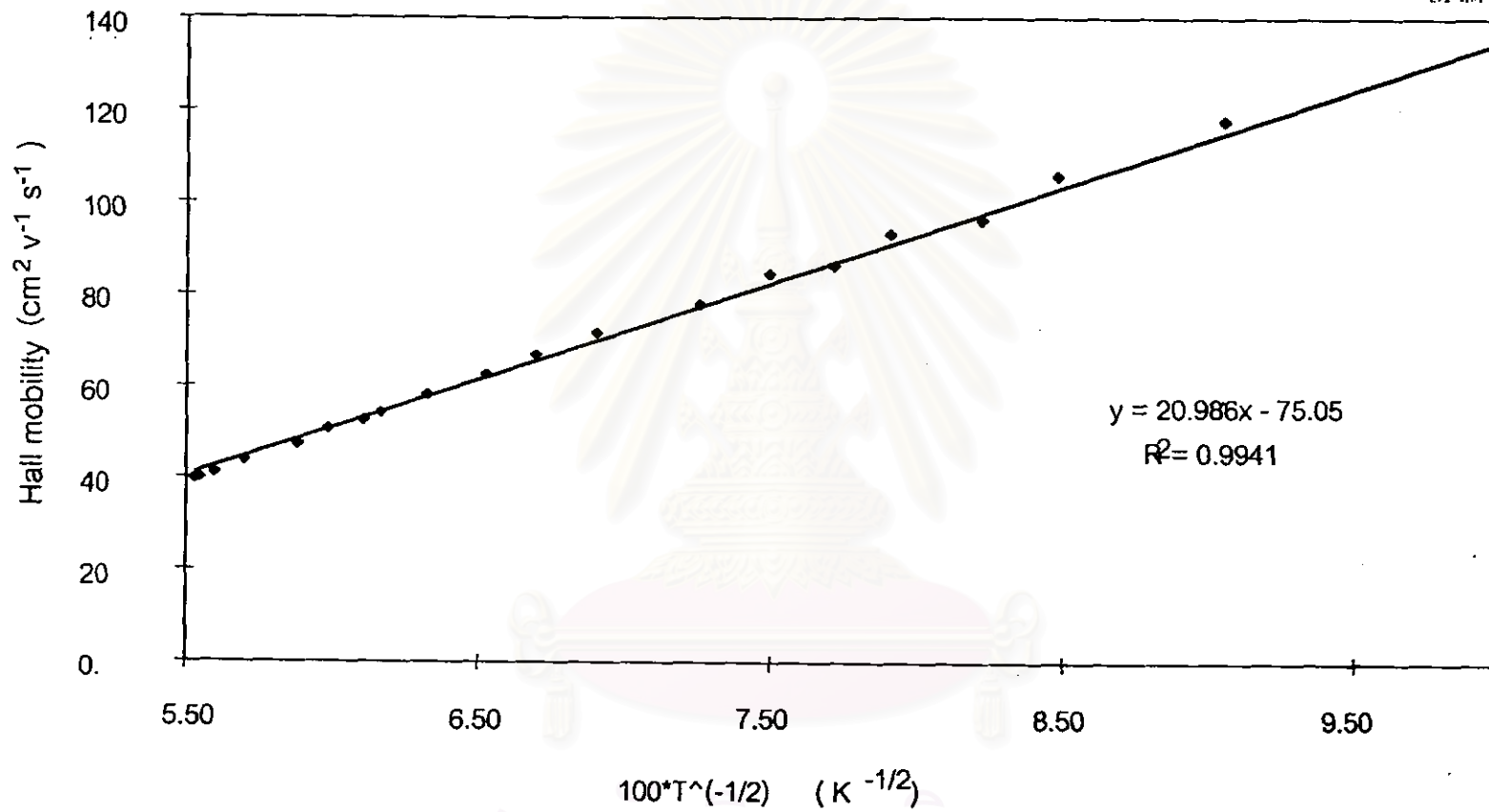
$$E_g = \frac{839.18 \times 1.38061 \times 10^{-23}}{1.60219 \times 10^{-19}}$$

$$= 72.31 \text{ meV}$$

สำหรับข้อมูลสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์จากตารางที่ 6.6 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์กับอุณหภูมิตามรูปที่ 6.68 จากการพิตข้อมูลจะเห็นว่าสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์แปรผันตรงกับ $T^{-1/2}$ ซึ่งจากลักษณะความสัมพันธ์เช่นนี้แสดงให้เห็นว่า กลไกการกระเจิงของพาหะอิสระ จะเป็นแบบ acoustic phonons ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก piezoelectric potential ดังที่ได้กล่าวไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\mu = \frac{16\sqrt{2} \rho \hbar^2 s^2 \epsilon^2 |e|}{3(e\hbar P_z)^2 (m^*)^{5/2} (k_B T)^{1/2}}$$

$$\mu = 2098.6 T^{-1/2}$$



รูปที่ 6.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพเคลื่อนที่ได้กับอุณหภูมิยกกำลัง(-1/2)