

การทดลอง และผลการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการทดลองคือ วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองกับอุณหภูมิ ในการทดลอง แบ่งเป็นช่วง ๆ ดังนี้

- ก. ทดลองการใช้งานของอุปกรณ์ชุดควบคุมอุณหภูมิ
- ข. การทดลอง เปรียบเทียบการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ของผลึก A โดยวิธีแบบธรรมดา กับแบบ แวน เคอร์ เพอร์
- ค. การวัดความหนาของผลึก B
- ง. ทดลองหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ของผลึก B ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยวิธีของแวน เคอร์ เพอร์

3.1 การทดลองเพื่อหาลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์ชุดควบคุมอุณหภูมิ

ในการทดลองตอนแรกได้ตรวจสอบความถูกต้องของการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ ซึ่งเป็นชนิดโครเมอลูเมล (Chromel-Alumel) โดยจุ่มขาข้างหนึ่งของเทอร์โมคัปเปิลลงในน้ำแข็ง และอีกขาหนึ่งจุ่มในน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งอ่านค่าของเทอร์โมมิเตอร์ที่มีความละเอียดและเที่ยงตรงสูง ปรากฏว่าความต่างศักย์ที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลวัดโดยเวอร์เนียร์โพเทนทิโอมิเตอร์มีค่าตรงกับตารางมาตรฐาน แสดงว่าเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้สามารถวัดอุณหภูมิถูกต้อง และวัดได้อุณหภูมิละเอียดถึง 0.1 °C

ในการทดลองหาลักษณะการใช้งานของอุปกรณ์ชุดควบคุมอุณหภูมิ ใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิตรงผลึกในภาชนะใส่ผลึก การทดลอง เป็นคั้งที่แสดงในรูป (2.7) หน้า (28)

ในการวิจัยได้วางกรอบทดลองเครื่องในอุณหภูมิห้อง (24.5°C) ใช้ความต่างศักย์ของเพาเวอร์เวอร์ซัพพลายที่ให้กำลังไฟฟ้าขนาดพอเหมาะแก่ลดความร้อน และตั้งความต้านทาน R_t ที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงในตาราง (3.1)

ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง R_t กับอุณหภูมิที่ควบคุมได้ (t)

ความต่างศักย์ (Volt)	R_t (ohm)	อุณหภูมิที่ควบคุมได้ (t) $^{\circ}\text{C}$
15	111.7	29.3
25	114.0	34.8
27	115.8	40.1
33	118.0	46.7
35	120.0	52.5
36	122.0	58.4
41	123.2	62.1
45	125.2	68.1
48	127.1	73.8
50	128.6	79.5
53	130.9	85.6
55	132.5	90.8
57	134.7	97.7

จากตาราง (3.1) กราฟระหว่าง R_t กับ t แสดงในรูป (3.1) ถ้า P เป็นกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ให้แก่วลควรร้อนและ Δt คืออุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างอุณหภูมิของฉลิกตัวอย่างกับอุณหภูมิภายนอกกระบอกทองเหลือง ความสัมพันธ์ระหว่าง P กับ Δt แสดงในตาราง (3.2) และกราฟระหว่าง P กับ Δt แสดงในรูป (3.2) เนื่องจากลวควรร้อนมีความต้านทาน 205 โอห์ม จากตารางที่ (3.1) เราสามารถหาลงกำลังไฟฟ้าจากความสัมพันธ์ $P = \frac{V^2}{R}$ ซึ่งค่ากำลังไฟฟ้านี้เป็นค่าโดยประมาณ ในการทดลองไม่จำเป็นต้องตรงพอดี ค่าใกล้เคียงก็ใช้ได้ สำหรับค่า Δt ที่สูงกว่านี้อาจหาได้จากกราฟในรูป (3.2) นี้ออกไป

ตารางที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Δt กับ P

อุณหภูมิที่แตกต่าง $\Delta t (^{\circ}\text{C})$	กำลังไฟฟ้า P (watt)
4.8	1.1
10.6	3.0
15.6	3.5
22.2	5.3
28.0	5.9
33.9	6.4
37.6	8.3
34.7	9.8
49.4	11.3
55.0	12.3
61.2	13.8
66.3	14.8
73.2	15.9

ตารางที่ (3.4) ข้างล่าง แสดงความต้านทานของฉนวนพลาสติก (R_p)
 ซึ่งใช้เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) ของวงจรควบคุมอุณหภูมิ
 จากทฤษฎี วงจรจะตัดกระแสไฟฟ้าไม่ให้ไหลในชกฉนวนความร้อนเมื่อ R_p ≥ R_t
 ซึ่งเราอาจตั้ง R_t ให้เท่ากับ R_p ที่อุณหภูมิซึ่งเราต้องการควบคุมอุณหภูมิได้ ในเชิง
 ปฏิบัติความต้านทาน R_t ที่ตั้งไว้ไม่เท่ากับ R_p แต่ไม่ต่างกันมากนัก ตามตาราง
 (3.4) ที่ 50°ซ R_p = 119.4 ohm ในการตั้ง R_t = R_p = 119.4 ohm
 พบว่าอุณหภูมิที่ควบคุมได้จากตาราง 3.1 กลับเป็น 52°ซ ซึ่งต่างไปจากที่คาดหมาย
 แต่ไม่ต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามในการวิจัยนี้เราอนุมัติใช้ค่า R_t = R_p
 สำหรับตั้งอุณหภูมิในการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ (3.3) แสดงตารางมาตรฐาน R_p กับอุณหภูมิ ซึ่งจะใช้ทั้ง R_t ตัวเลขในตารางเป็นค่าความต้านทาน R_p

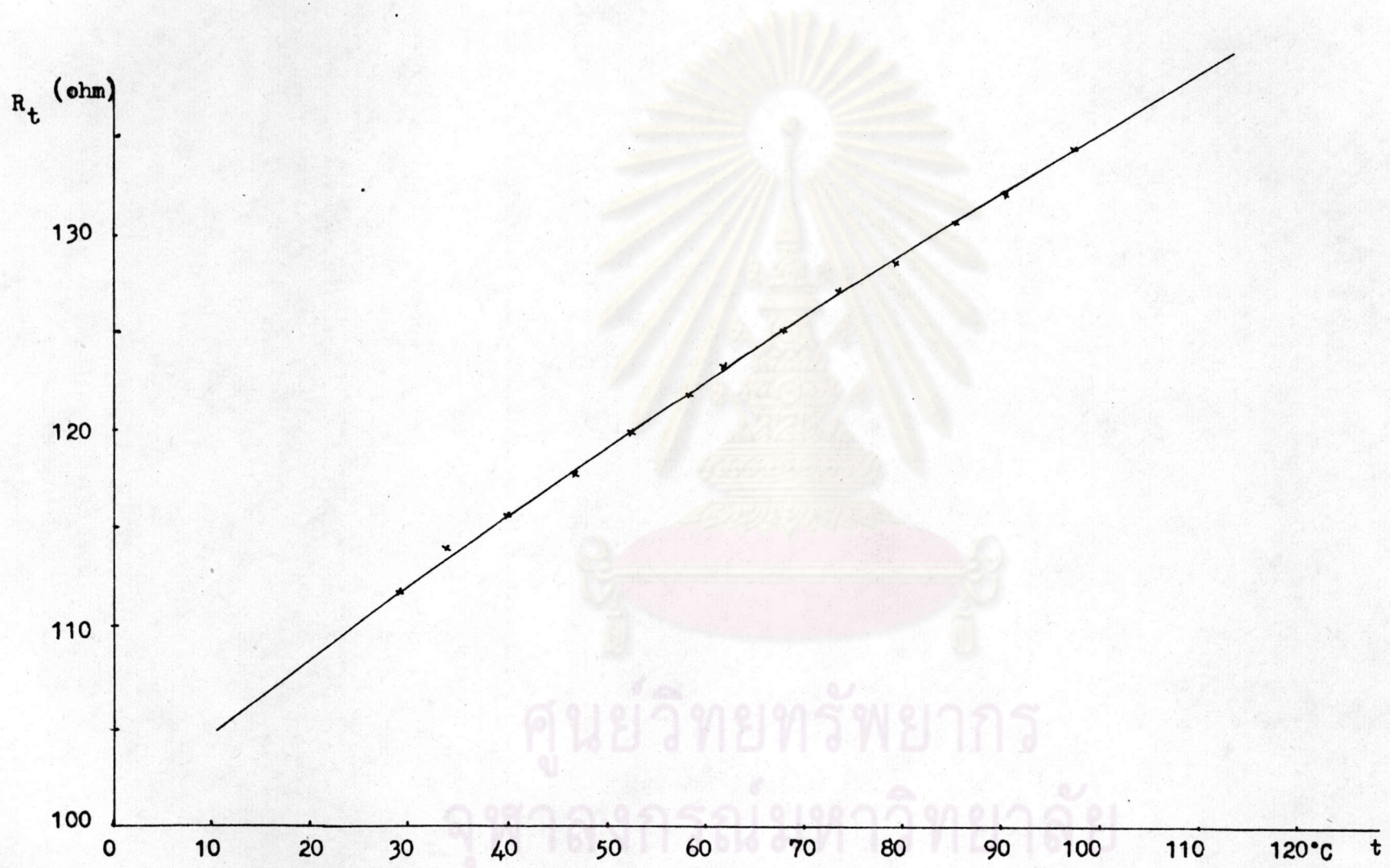
$t^{\circ}c$	- 0	- 10	-20	- 30	- 40	- 50	- 60	-70	- 80	- 90
-200	18.56	14.40	10.45							
-100	60.28	56.21	52.12	48.01	43.88	39.72	35.54	31.34	27.11	22.83
-0	100	96.09	92.16	88.23	84.29	80.32	76.34	72.35	68.34	64.32
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	100	103.9	107.79	111.67	115.54	119.4	123.24	127.07	130.89	134.7
100	138.5	142.29	146.06	149.82	153.57	157.31	161.04	164.76	168.46	172.16
200	175.83	179.50	183.16	186.82	190.45	194.07	197.69	201.29	204.88	208.46
300	212.02	215.58	219.12	222.66	226.18	229.69	233.19	236.68	240.16	243.61
400	247.08	250.52	253.95	257.37	260.77	264.17	267.56	270.94	274.29	277.64
500	280.98	284.31	287.63	290.93	294.22	297.50	300.76	304.02	307.27	310.51

เครื่องมือชุดนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้กระเพื่อมน้อยกว่า 0.2°C ในที่นี้ จะยกตัวอย่างบางส่วนของการทำงานของเครื่องมือโดยยกเอาช่วง 30 นาที สุดท้ายของการทดลองควบคุมอุณหภูมิที่ 52.5°C ดังแสดงในตาราง (3.3) และรูป (3.3)

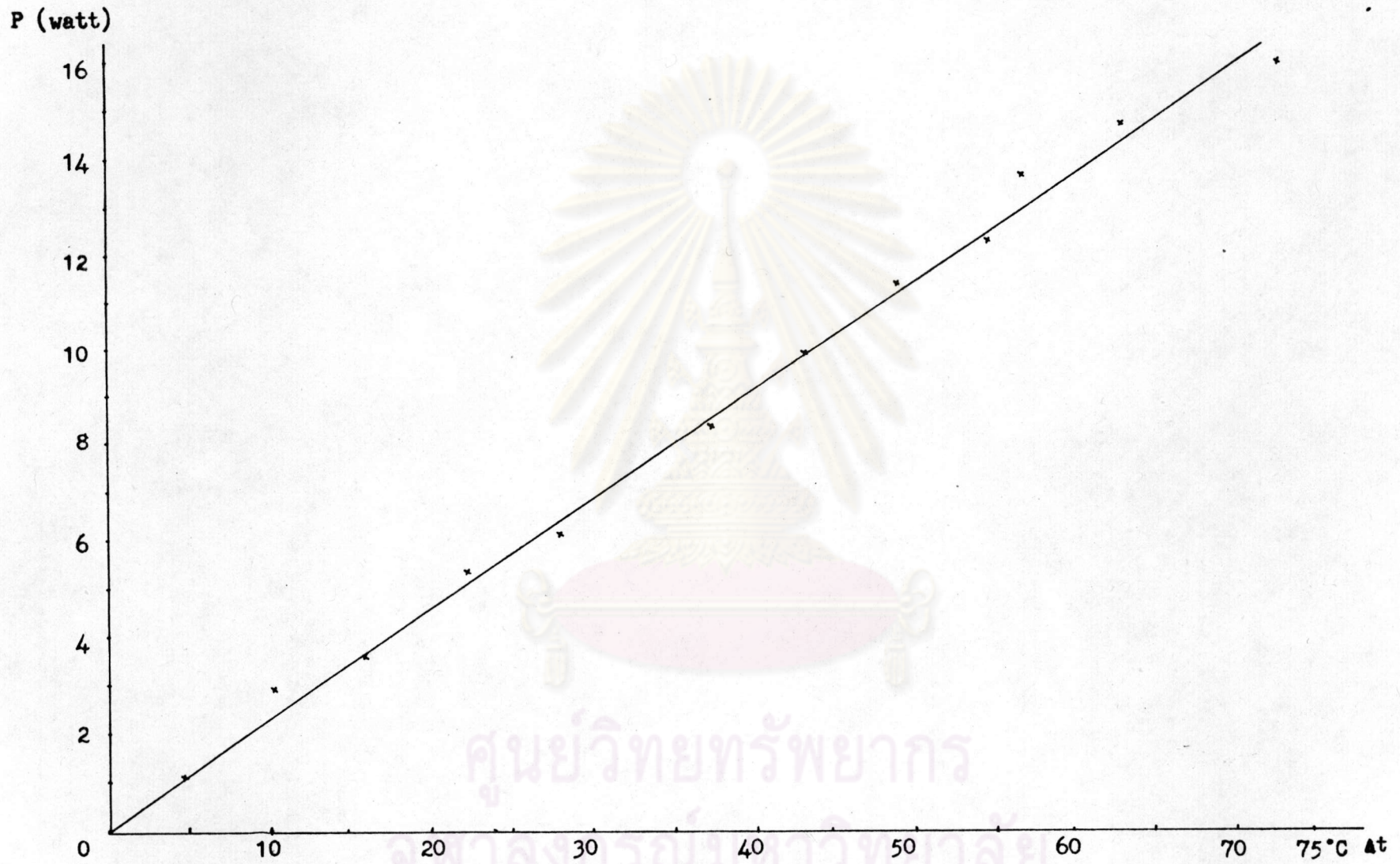
ตารางที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์เวลาช่วง 30 นาทีสุดท้าย กับอุณหภูมิที่ควบคุม

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ $^{\circ}\text{C}$
-	-
-	-
-	-
0	52.0
5	52.4
10	52.5
15	52.5
20	52.5
25	52.5
30	52.5

ศูนย์วิทยการแพทย์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



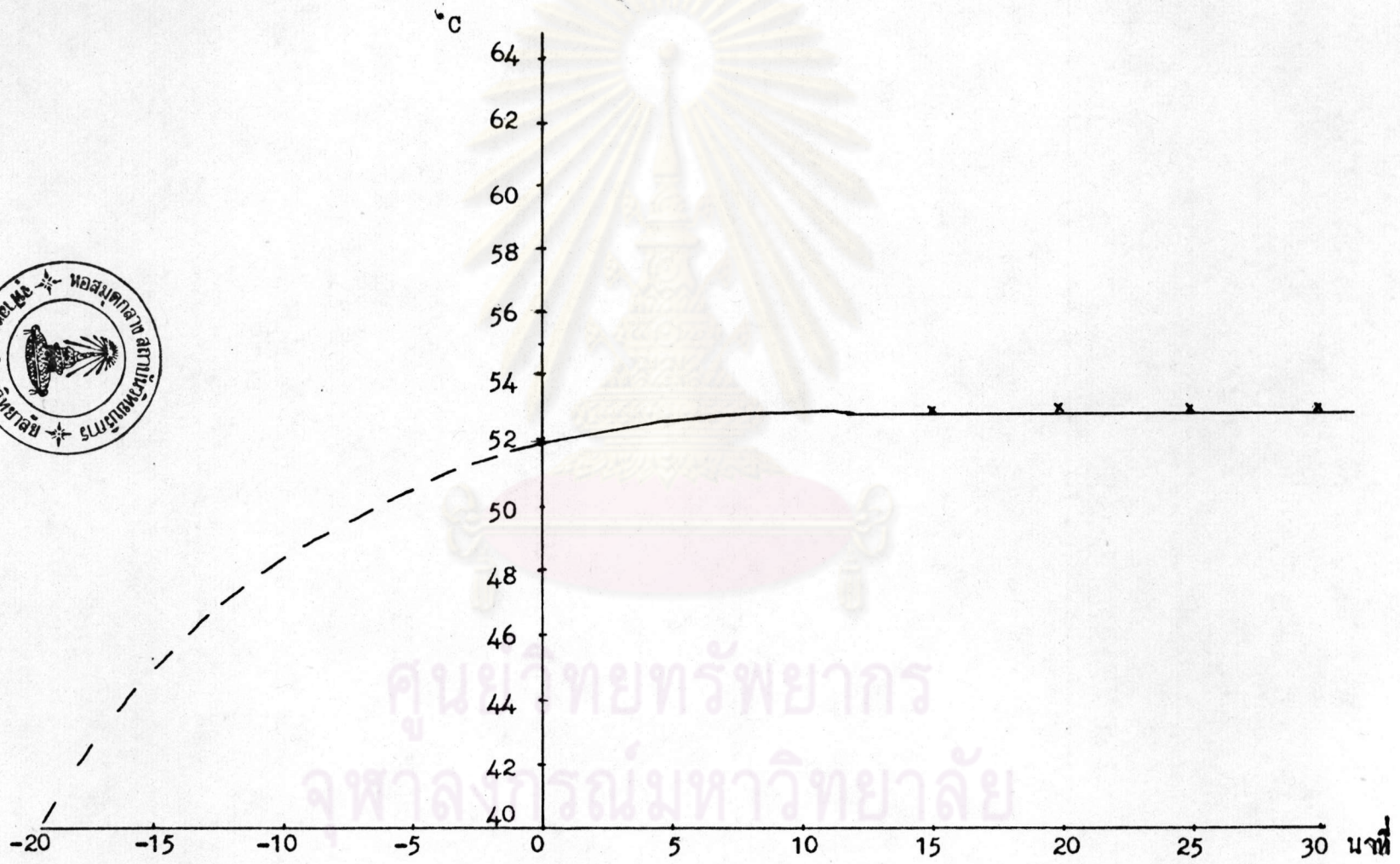
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_t กับอุณหภูมิที่ควบคุมได้ (t)



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง P กับ ΔT

ศูนย์วิทยทรัพยากร

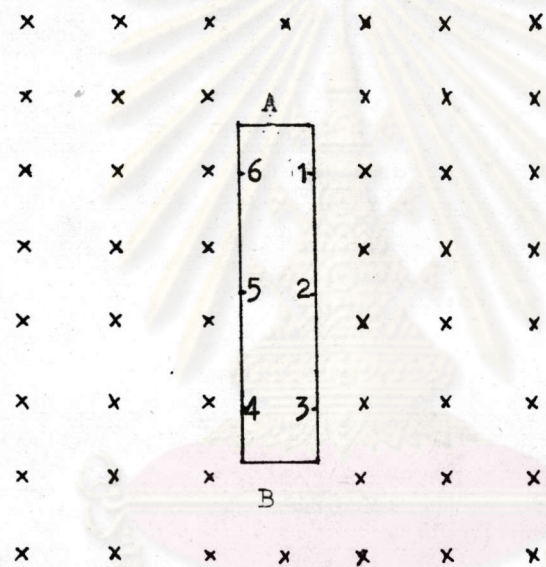
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ อุณหภูมิควบคุมได้ (t) กับเวลาในช่วง 30 นาทีสุดท้าย

3.2 ทดลองเปรียบเทียบการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์โดยวิธี ธรรมดา กับวิธีของแวน เคอร์ เพาว์

การทดลองใช้ผลึก A ซึ่งมีรูปร่างสี่เหลี่ยมกว้าง 4.1 มม. ยาว 1.81 ซม. หน้า 0.382 มม. วางอุปกรณ์การทดลองดังรูป (2.12) หน้า (33) ใช้เวอริเนียร์โพเทนทิโอมิเตอร์วัดความต่างศักย์ และใช้คิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านผลึก A ในการวิจัยเพื่อวัดสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ว่างผลึก A ในสนามแม่เหล็ก ลักษณะการวางแสดงในรูป (3.4)



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการวางผลึก A ในสนามแม่เหล็กซึ่งพุ่งเข้ากระดาษ

3.2.1 วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ของผลึก A โดยวิธี

ธรรมดา

ก. วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

ให้กระแสไฟฟ้าไหลจาก A ไป B ขณะที่ไม่มีสนามแม่เหล็ก วัดความต่างศักย์ระหว่างจุด 1 กับ 3 และ 4 กับ 6 ผลการทดลองแสดงในตาราง (3.5)

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการวัดค่าสภาพต้านทานผลึก A โดยวิธีขรรจรคา

I_{AB} (mA)	V_{13} (mV)	V_{64} (mV)
0.30	44.86	43.45
0.60	88.25	86.69
0.90	131.02	129.68
1.20	175.00	173.16
1.50	217.22	216.42

จากตาราง (3.5) ได้ความชัน $\frac{\Delta V_{13}}{\Delta I_{AB}}$ และ $\frac{\Delta V_{64}}{\Delta I_{AB}}$ เท่ากับ 143.63 และ 144.14 โห์ตมตามลำดับ จากค่าความชัน $\Delta V_{13} / \Delta I_{AB}$ หาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าได้จากความสัมพันธ์

$$\rho = \frac{\Delta V_{13}^{ab}}{\Delta I_{AB} l_{13}}$$

ρ คือ สภาพความต้านทาน

a คือ ความกว้างของผลึก A = 0.41 cm.

b คือ ความหนาของผลึก A = 0.0382 cm.

l_{13} คือ ระยะห่างจากจุด 1 กับ 3 = 1.31 cm.

ค่า ρ จาก V_{64} ก็อาจหาได้แบบเดียวกัน ผลการคำนวณแสดงในตาราง

(3.6)

ตารางที่ 3.6 แสดงผลการคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ

ซีว	ความชัน (โอห์ม)	สภาพต้านทาน ρ (ohm-cm.)	เฉลี่ย (ohm-cm)
13	143.63	1.717	1.72
64	144.14	1.723	

ข. การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์โดยวิธีธรรมดา

ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด A จาก A ไป B วัดความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 กับ 5 โดยมีสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับระนาบของขดลวด A ดังรูป (3.4) ในการทดลองได้ลองกลับกระแสที่ $I = 0.500 \text{ mA}$ และ $I = 1.000 \text{ mA}$ ปรากฏว่าค่า V_{25} ที่วัดได้ผลใกล้เคียงกันและความชันไม่แตกต่างกัน แสดงว่าจุดสัมผัสทางไฟฟ้า (electrical contact) ไม่ได้ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด ผลการทดลองแสดงในตารางที่ (3.7)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 แสดงผลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์แบบวีธีธรรมดา

B (tesla)	I_{AB}	0.500mA	-0.500mA	1.000 mA	-1.00 mA	1.500 mA
		V_{25} (mV)	V_{52} (mV)	V_{25} (mV)	V_{52} (mV)	V_{25} (mV)
0		0.90	0.92	1.86	1.86	2.81
0.075		0.95	0.97	1.96	1.96	2.95
0.155		1.01	1.03	2.06	2.06	3.11
0.230		1.06	1.08	2.17	2.17	3.28
0.305		1.11	1.13	2.28	2.28	3.43
0.365		1.15	1.17	2.37	2.37	3.57

จากตาราง (3.7) จะเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{25} กับ B
 เฉพาะที่ $I_{AB} = 0.500 \text{ mA}$ แสดงในรูป (3.5) ผลการทดลองได้
 ความชัน $\Delta V_{25} / \Delta B$ และหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์จากสมการ

$$R_H = \frac{\Delta V_{25} b}{\Delta B I} \quad (3.2)$$

R_H คือ สัมประสิทธิ์ของฮอลล์

b คือ ความหนาของผลึก $A = 3.82 \times 10^{-4}$ เมตร

จากค่าความชัน $\frac{\Delta V_{25}}{\Delta B}$ I และ b ได้ผลการคำนวณแสดงใน
 ตาราง (3.8)

ตารางที่ 3.8 แสดงผลการคำนวณหาค่า R_H

I_{AB} (mA)	$\frac{\Delta V_{25}}{\Delta B}$ $\frac{mV}{tesla}$	$R_H \times 10^{-4} \frac{m^3}{coul}$
0.500	0.695	5.31
-0.500	-0.692	5.29
1.000	1.386	5.29
-1.000	-1.386	5.29
1.500	2.105	5.36

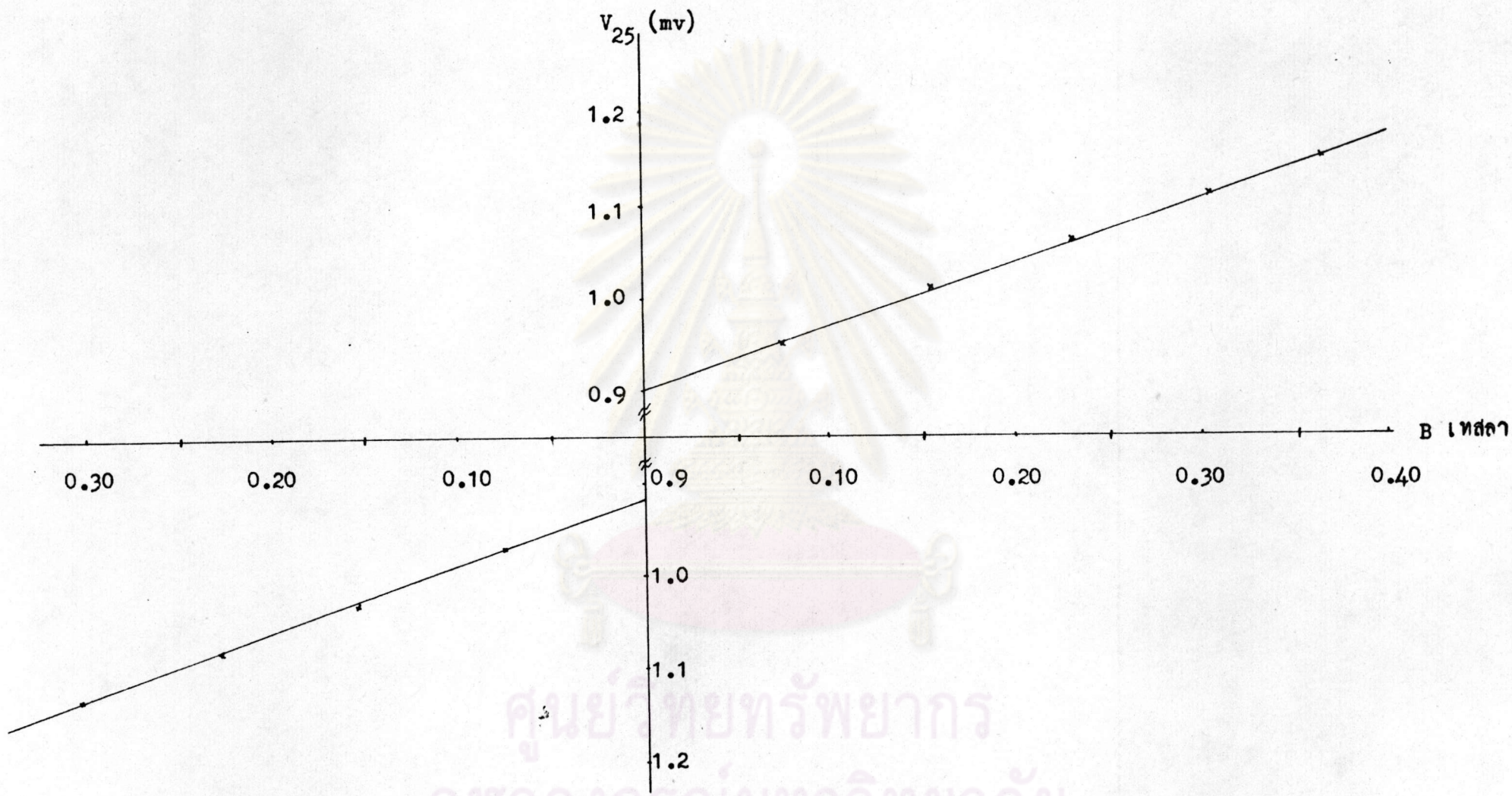
ค่าเฉลี่ยทุกกระแส $R_H = (5.31 \pm 0.03) \times 10^{-4} \frac{m^3}{coul}$

3.2.2 การทดลองวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ โดยวิธีของแวน เคอร์ เพาว์

การทดลองวางอุปกรณ์ตามรูป (2.12) หน้า (33) และการวาง
ขดลวด A ตามรูป (3.4) ซึ่งเหมือนกับหัวข้อ ของ (3.2.1) ในหัวข้อนี้แบ่งเป็น
2 ตอน

ก. การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีของ แวน เคอร์ เพาว์

ในการทดลองให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวด A จากจุด 1 ไป 3
วัดความต่างศักย์ระหว่างจุด 4 กับ 6 จะได้ค่า $R_{13,46}$ ซึ่งเท่ากับ $\frac{\Delta V_{46}}{\Delta I_{13}}$
หลังจากนั้นให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าจุด 3 ไป 4 วัดความต่างศักย์ระหว่างจุด 6 กับ 1
ได้ค่า $R_{34,61}$ ซึ่งเท่ากับ $\frac{\Delta V_{61}}{\Delta I_{34}}$ ผลการทดลองแสดงในตาราง (3.9)



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง B กับ V₂₅ ที่ I_{AB} = 0.500 mA

ตารางที่ 3.9 แสดงผลการทดลองหาค่าความต้านทานของผลึก A โดยวิธีของ
แวน เคอร์ เพาว์

$R_{13,46}$		$R_{34,61}$	
$I_{13}(\text{mA})$	$V_{46}(\text{mV})$	$I_{34}(\text{mA})$	$V_{61}(\mu\text{V})$
0.30	-36.86	2.0	-17
0.60	-73.72	4.0	-22
0.90	-110.57	6.0	-30
1.20	-147.20	8.0	-36
1.50	-183.95	10.0	-42

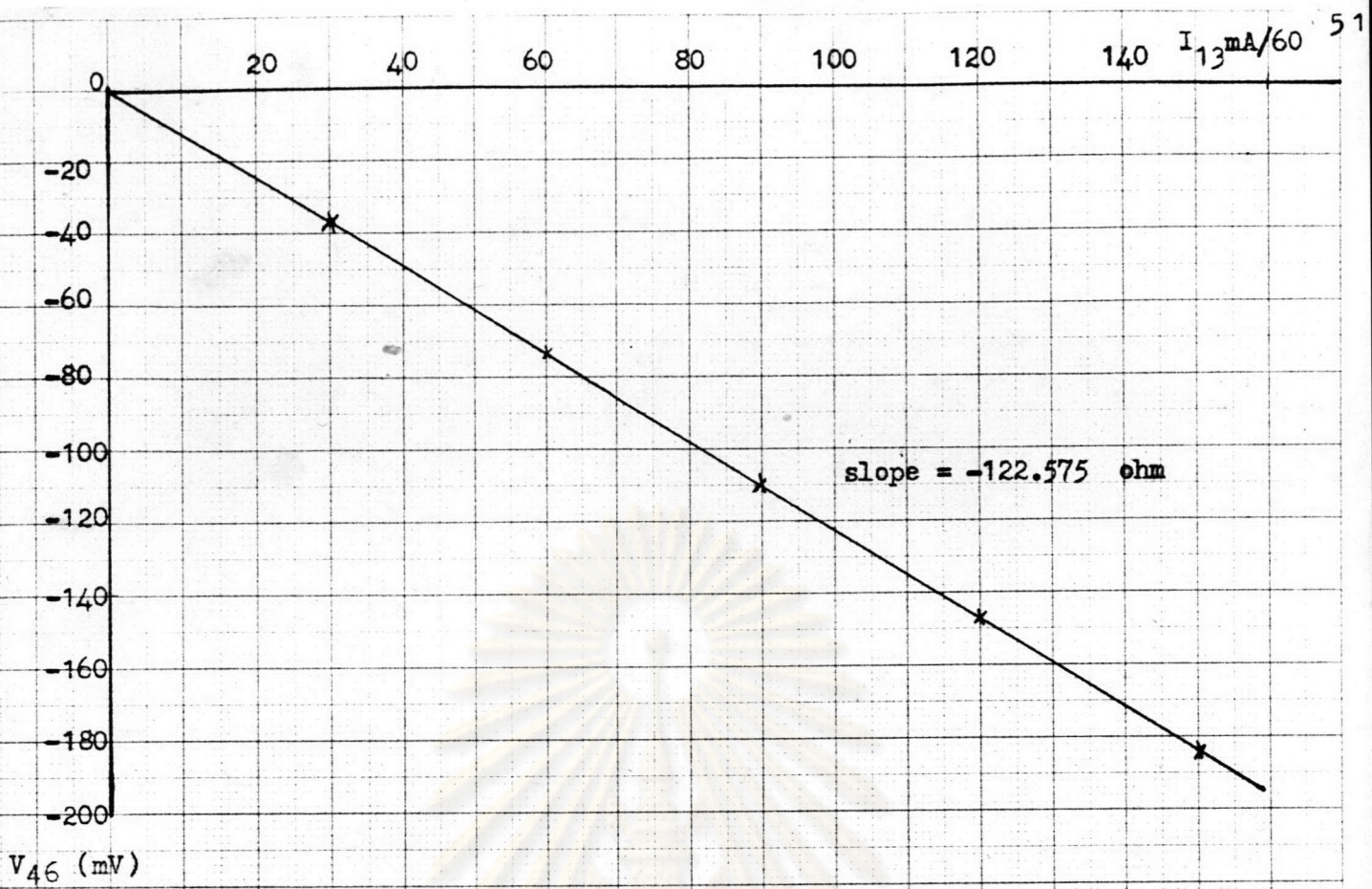
จากตาราง (3.9) เขียนกราฟระหว่าง I กับ V แสดงในรูป (3.6)
และรูป (3.7) หาค่าความชัน $R_{13,46} = \frac{\Delta V_{46}}{\Delta I_{13}} = -122.575$ โวลต์/แอมแปร์

และ $R_{34,61} = -3.167 \times 10^{-3}$ โวลต์/แอมแปร์ หาค่า ρ ได้จาก
ความสัมพันธ์

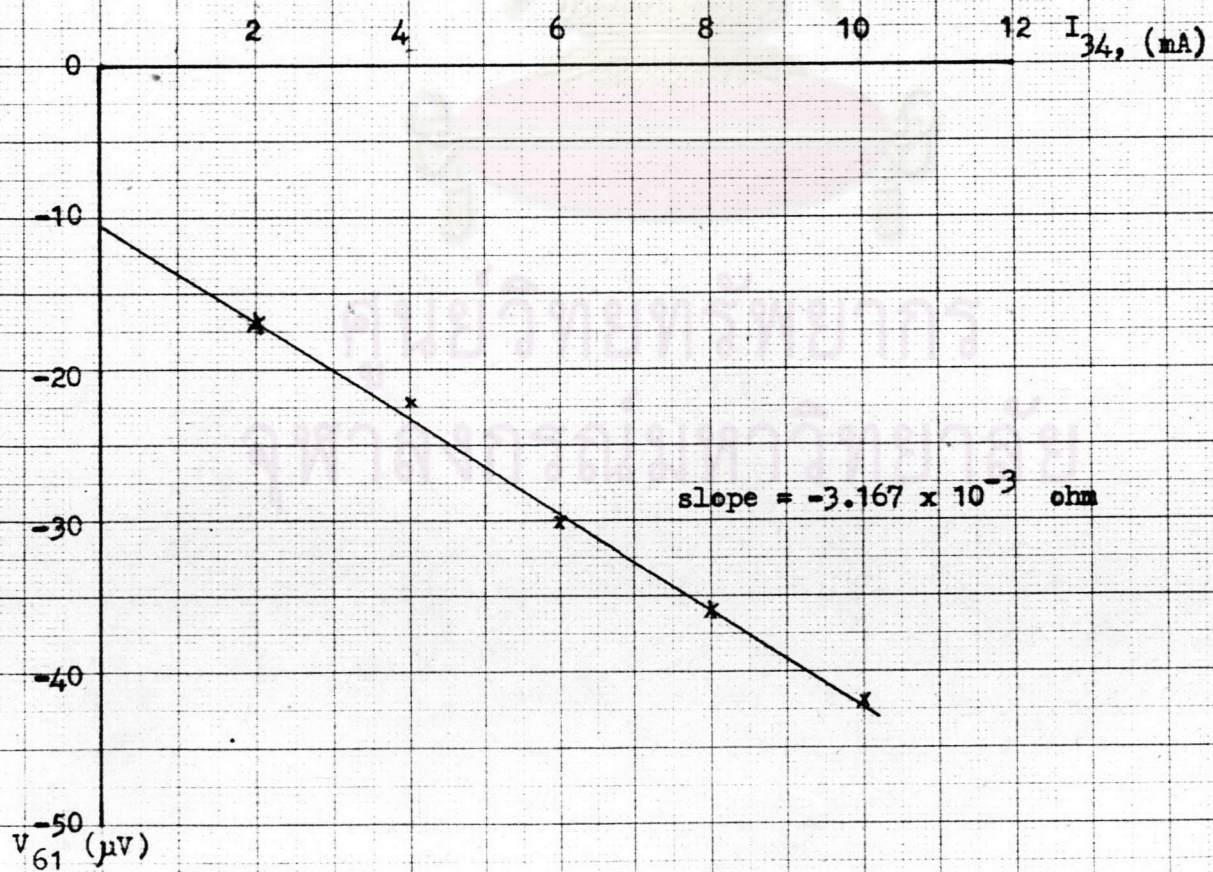
$$e^{-\pi |R_{13,46}| b/\rho} + e^{-\pi |R_{34,61}| b/\rho} = 1 \quad (3.3)$$

แทนค่า $R_{13,46} = -122.575$ โวลต์/แอมแปร์ $R_{34,61} = -3.167 \times 10^{-3}$
โวลต์/แอมแปร์ และ $b = 0.0382$ cm. ได้ $\rho = 1.75$ ohm-cm.

เปรียบเทียบการวัด ρ วิธีธรรมดา กับวิธีของแวนเคอร์เพาว์แสดงใน
ตาราง (3.10)



รูปที่ 3.6 แสดงผลการทดลองหาค่า $R_{13,46}$



รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ I_{34} กับ V_{61} หาค่า $R_{34,61}$

ตารางที่ 3.10 เปรียบเทียบการวัด ρ แบบแวนเคอร์เพอร์กับแบบธรรมดา

ρ (ohm-cm)		ความคลาดเคลื่อน
วัดแบบธรรมดา	วัดแบบแวนเคอร์เพอร์	
1.72	1.75	1.7 %

จะเห็นได้ว่าการวัด ρ แบบแวนเคอร์เพอร์คลาดเคลื่อนจากการวัดแบบธรรมดาน้อยมาก การวัดทั้งสองวิธีให้ผลใกล้เคียงกัน

ข. การวัดค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์โดยวิธีของแวนเคอร์เพอร์ของผลึก A

การทดลองให้กระแสไหลผ่านขั้ว 1 กับ 4 วัดความต่างศักย์ระหว่าง 2 กับ 5
 ได้ค่า $R_{14,25}$ คือ $\frac{\Delta V_{25}}{\Delta I_{14}}$ ที่สนามความเข้มต่าง ๆ ผลการทดลอง

ตารางที่ 3.11 การทดลองวัด $R_{14,25}$ ที่สนามแม่เหล็กความเข้มต่าง ๆ

I_{14} (mA)	0.500	-0.500	1.000	1.500
B (เทสลา)	V_{25} (mV)	V_{52} (mV)	V_{25} (mV)	V_{25}
0	1.17	1.18	2.37	3.57
0.075	1.22	1.23	2.47	3.72
0.155	1.28	1.29	2.59	3.90
0.230	1.33	1.34	2.70	4.07
0.305	1.38	1.39	2.80	4.23
0.365	1.43	1.44	2.90	4.36



รูปที่ 3.8 การทดลองวัด $R_{14,25}$ ที่ $I_{14} = 0.500 \text{ mA}$

หาค่าของ R_H ได้จากสมการ

$$R_H = \frac{b \left[R_{14,25}(B) - R_{14,25}(0) \right]}{B} = \frac{b \Delta R_{14,25}}{\Delta B}$$

$$= \frac{b}{I_{14}} \cdot \frac{\Delta V_{25}}{\Delta B} \quad (3.4)$$

รูป (3.8) แสดงกราฟระหว่าง B กับ V_{25} เมื่อกระแส $I_{14} = 0.500 \text{ mA}$ จาก 1 ไป 4 และ 4 ไป 1 พบว่าความชัน $\Delta V_{25} / \Delta B$ มีค่าเกือบเท่ากัน แสดงว่าการกลับกระแสไม่ได้ให้ค่าผิดไปหลังจากแทนค่าความชันลงในสมการ (3.4) จะได้ R_H ผลลัพธ์ที่ได้จึงลดผลกระทบทั้งสามแสดงอยู่ในตาราง (3.12)

ตารางที่ 3.12 แสดงผลการคำนวณค่า R_H ที่กระแสต่าง ๆ

I_{14} (mA)	$\Delta V_{25} / \Delta B \times 10^3 \frac{\text{volt}}{\text{tesla}}$	$R_H \times 10^{-4} (\text{m}^3/\text{coul})$
0.500	0.710	5.38
0.500	0.698	5.33
1.000	1.449	5.53
1.500	2.151	5.48

ค่าเฉลี่ยของ $R_H = (5.43 \pm 0.08) \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{coul}$

ในการวิจัยได้ทดลองให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขั้ว A จากขั้ว 2 ไป 4 วัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 3 กับ 5 ที่ความเข้มข้นแม่เหล็กต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ครั้งก่อน ผลการทดลองแสดงในตาราง (3.13)

ตารางที่ 3.13 แสดงผลการวัด $R_{24,35}$ ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่าง ๆ

B (tesla)	$I_{24} = 0.500 \text{ mA}$ $V_{35} \text{ (mV)}$	$I_{24} = 1.000 \text{ mA}$ $V_{35} \text{ (mV)}$
0	-25.20	-50.44
0.075	-25.15	-50.34
0.155	-25.08	-50.24
0.230	-25.03	-50.13
0.305	-25.00	-50.04
0.365	-24.95	-49.96

จากตาราง (3.13) ใช้การคำนวณเหมือนกับกรณีให้กระแสผ่านขั้ว 1 ไป
4 วัดความต่างศักย์ 2 กับ 5 ได้ผลแสดงในตารางที่ (3.14)

ตารางที่ 3.14 แสดงผลการคำนวณ R_H ที่กระแสต่าง ๆ

$I_{24} \text{ (mA)}$	$\frac{\Delta V_{35} \times 10^{-3} \text{ volt}}{\Delta B \text{ tesla}}$	$R_H \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{coul}}$	$R_H \text{ (เฉลี่ย)} \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{coul}}$
0.500	0.658	5.03	5.035
1.000	1.319	5.04	

เปรียบเทียบการวัด R_H แบบ แวน เคอร์ เพาว์ กับการวัด R_H
แบบธรรมดา แสดงในตาราง (3.15)

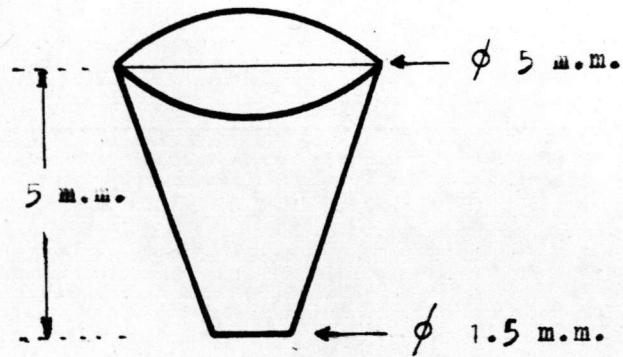
ตารางที่ 3.15 เปรียบเทียบการวัด R_H วิธีแวน เกอร์ เพาว์ กับวิธีธรรมดา

การวัดแบบแวนเกอร์เพาว์	การวัดแบบธรรมดา	ความคลาดเคลื่อน
วิธีการวัด $R_H \times 10^{-4} \frac{m^3}{coul}$	$R_H \times 10^{-4} \frac{m^3}{coul}$	
$R_{14, 25}$ 5.43	5.31	2.26 %
$R_{24, 35}$ 5.035		5.18 %

จากตารางที่ (3.15) จะเห็นว่าการวัด R_H แบบแวนเกอร์เพาว์ โดยใช้ค่า $R_{14, 25}$ มีผลคลาดจากการวัดแบบธรรมดาน้อยกว่าใช้ค่า $R_{24, 35}$ แต่การวัดแบบแวนเกอร์เพาว์ทั้งสองวิธีใกล้เคียงกับการวัดแบบธรรมดา แสดงว่าการวัดแบบแวนเกอร์เพาว์วัด R_H ได้ถูกต้อง แต่จะถูกต้องก็ขึ้นถ้าเลือกใช้ชุดวัดที่เหมาะสม

3.3 การวัดความหนาของผลึก B ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ในการวัดใช้ไมโครมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัด เนื่องจากขาของไมโครมิเตอร์มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความกว้างของผลึก B ดังนั้นในการวัดทำโดยกดถึงทองเหลือง มีลักษณะดังรูปที่ (3.9) จำนวน 2 ชั้น ส่วนบนมีขนาดเท่ากับขาของไมโครมิเตอร์ ส่วนล่างมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตรคิศาของไมโครมิเตอร์วัดความหนาของผลึก กิ่งตัวนำ B ในตำแหน่งต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงในตาราง (3.16) ได้ความหนาเฉลี่ยของผลึก B = 1.003 มิลลิเมตร



รูปที่ (3.9) แสดงลักษณะของเหล็กที่กลึงศึกษาไมโครมิเตอร์

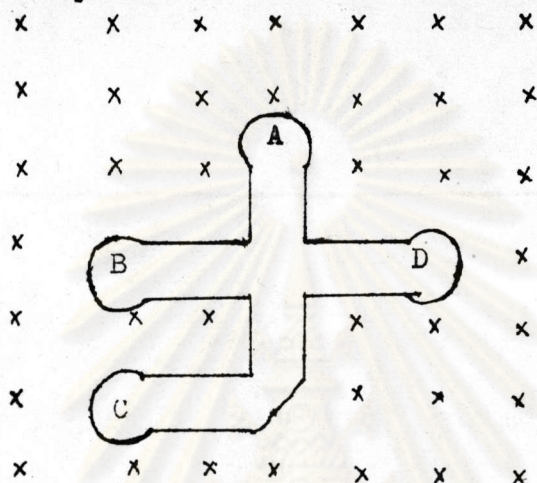
ตารางที่ 3.16 แสดงผลการวัดความหนาเฉลี่ย B ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งต่าง ๆ	ความหนา (ม.ม.)
1	1.000
2	1.001
3	1.006
4	1.005
5	0.999
6	1.005
7	1.006
8	1.004
9	0.997
10	1.004

ความหนาเฉลี่ย 1.003 ± 0.003 ม.ม.

3.4 การวัด ρ และ R_H โดยวิธีของแวน เคอร์ เทอร์ ของผลึก B ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ในการทดลองจickอุปกรณ์ทดลองเหมือนในการฝึกก่อนการวางผลึก B ในสนามแม่เหล็กแสดงในรูป (3.10)



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะลิววางผลึก B ในสนามแม่เหล็ก

ในตอนแรกได้วัดค่าสภาพต้านทาน (ρ) โดยการวัดค่า $R_{AB,CD}$ และ $R_{BC,DA}$ ในตอนต่อมาทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ (R_H) ได้วัดค่าที่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่าง ๆ การทดลองทั้งสองทำในช่วงอุณหภูมิ 14° ซ ถึง 192° ซ ผลการทดลองวัด สำหรับที่อุณหภูมิ 191.7° ซ แสดงไว้เป็นตัวอย่างในตาราง (3.17) จากการเขียนกราฟระหว่าง V กับ I ดังแสดงในรูป (3.11) พบว่า

$$R_{AB,CD} = \frac{\Delta V_{CD}}{\Delta I_{AB}} = -249.70 \text{ ohm.}$$

$$\text{และ } R_{BC,DA} = \frac{\Delta V_{DA}}{\Delta I_{BC}} = -144.21 \text{ ohm.}$$



ตารางที่ 3.17 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ρ โดยวัด $R_{AB,CD}$ และ $R_{BC,DA}$

$R_{AB,CD}$		$R_{BC,DA}$	
I_{AB} (mA)	V_{DA} (mV)	I_{BC} (mA)	V_{DA} (mV)
0	0.05	0	-0.19
0.20	-50.69	0.20	-31.55
0.40	-104.38	0.40	-61.04
0.60	-155.11	0.60	-90.14
0.80	-205.83	0.80	-120.00
1.00	-256.51	1.00	-148.71
1.20	-307.75	1.20	-176.57
1.40	-357.15	1.40	-205.17
1.60	-407.13	1.60	-233.80
1.80	-458.18	1.80	-262.35
2.00	-504.36	2.00	-287.20

จากค่า $R_{AB,CD}$ และ $R_{BC,DA}$ หาค่า ρ ได้โดยสมการ

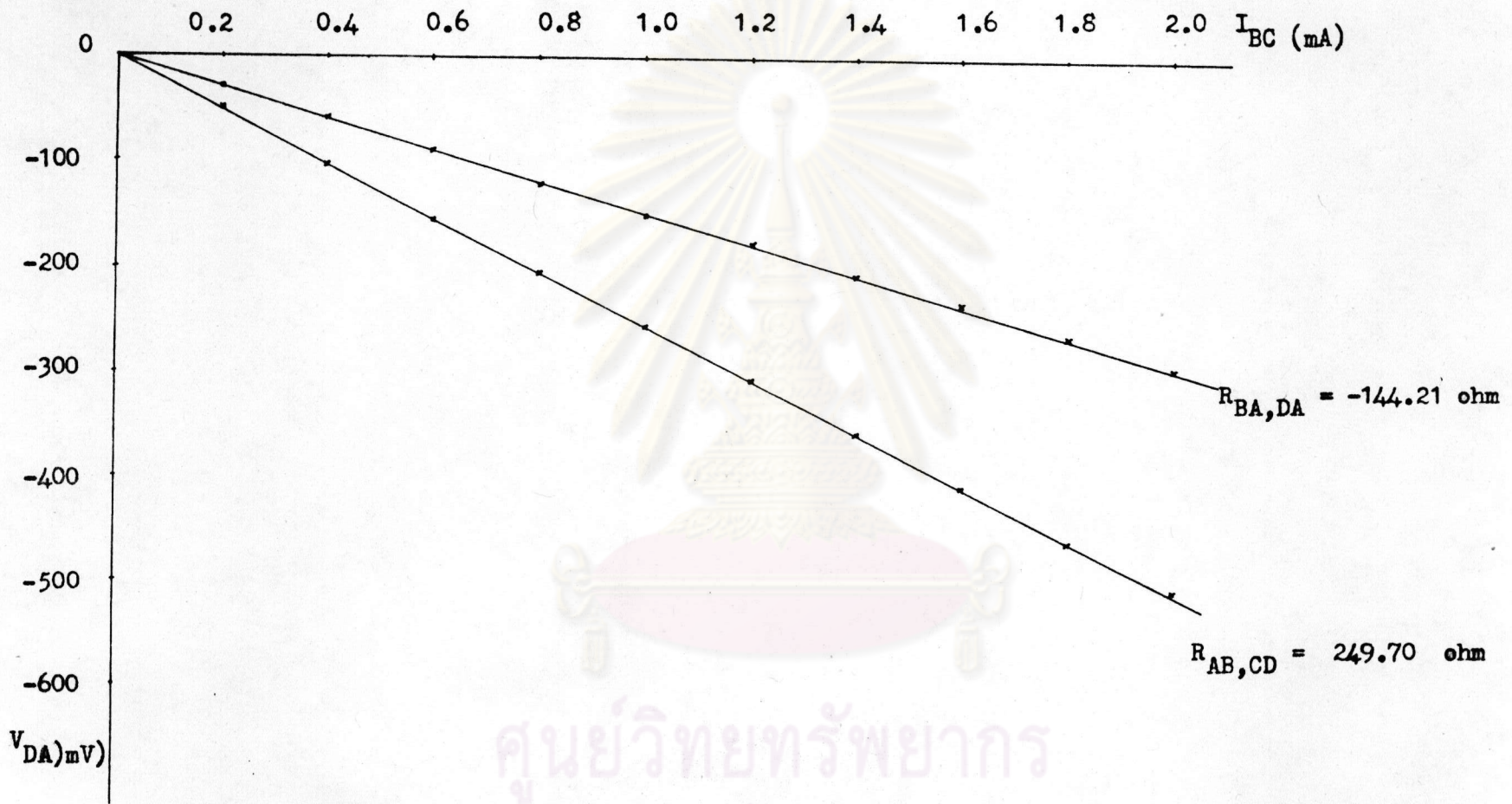
$$\exp\left(-\pi \sqrt{\frac{R_{AB,CD}}{b/\rho}}\right) + \exp\left(-\pi \sqrt{\frac{R_{BC,DA}}{b/\rho}}\right) = 1 \quad (3.5)$$

แทนค่า $R_{AB,CD}$ $R_{BC,DA}$ และ b ก็คือความหนาขดลวด B

$$b = 1.003 \times 10^{-1} \text{ cm.}$$

$$\text{ได้ค่า } \rho = 87.2 \text{ ohm. cm.}$$

ผลการทดลองหาค่า R_H สำหรับที่อุณหภูมิ 191.7°K แสดงไว้เป็นตัวอย่าง
ในตาราง (3.18)



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ I_{AB} กับ V_{CD} และ I_{BC} กับ V_{DA} ของการวัดค่า ρ ของผลึก B

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.18 แสดงการทดสอบของวัฏ $R_{BD,AC}$ ที่ความเข้มข้นแอมเพิลที่ต่าง ๆ ของบัลลิก B ที่อุณหภูมิ 191.7°K

- V_{AC} (mV)										
B (tesla)	0	0.187	0.365	0.535	0.6925	0.800	0.900	0.976	1.05	1.10
I_{BD} (mA)	0	0.24	0.21	0.22	0.22	0.23	0.21	0.23	0.22	0.04
0	0.26	0.24	0.21	0.22	0.22	0.23	0.21	0.23	0.22	0.04
0.20	22.25	24.51	26.47	28.32	29.46	31.23	32.30	33.53	34.32	35.00
0.40	43.08	47.45	50.69	54.02	56.91	60.25	61.58	63.87	65.23	66.79
0.60	64.14	70.35	79.80	79.42	84.66	89.44	92.14	94.00	96.70	98.26
0.80	84.73	92.56	98.55	104.68	110.81	117.00	121.04	125.00	127.21	129.62
1.00	104.43	114.46	122.48	103.76	138.41	145.19	150.67	154.88	158.57	160.64
1.20	125.40	137.34	146.56	156.87	165.44	174.09	180.98	185.29	189.42	193.18
1.40	145.35	158.80	169.00	182.00	191.68	202.16	209.67	214.50	218.67	223.78
1.60	164.97	180.10	192.71	205.60	218.00	230.43	238.00	244.73	250.13	255.12
1.80	185.00	201.41	216.70	231.67	245.28	258.08	266.72	274.58	280.60	286.60
2.00	205.07	224.06	239.19	256.17	271.05	284.39	295.25	304.50	310.33	316.24

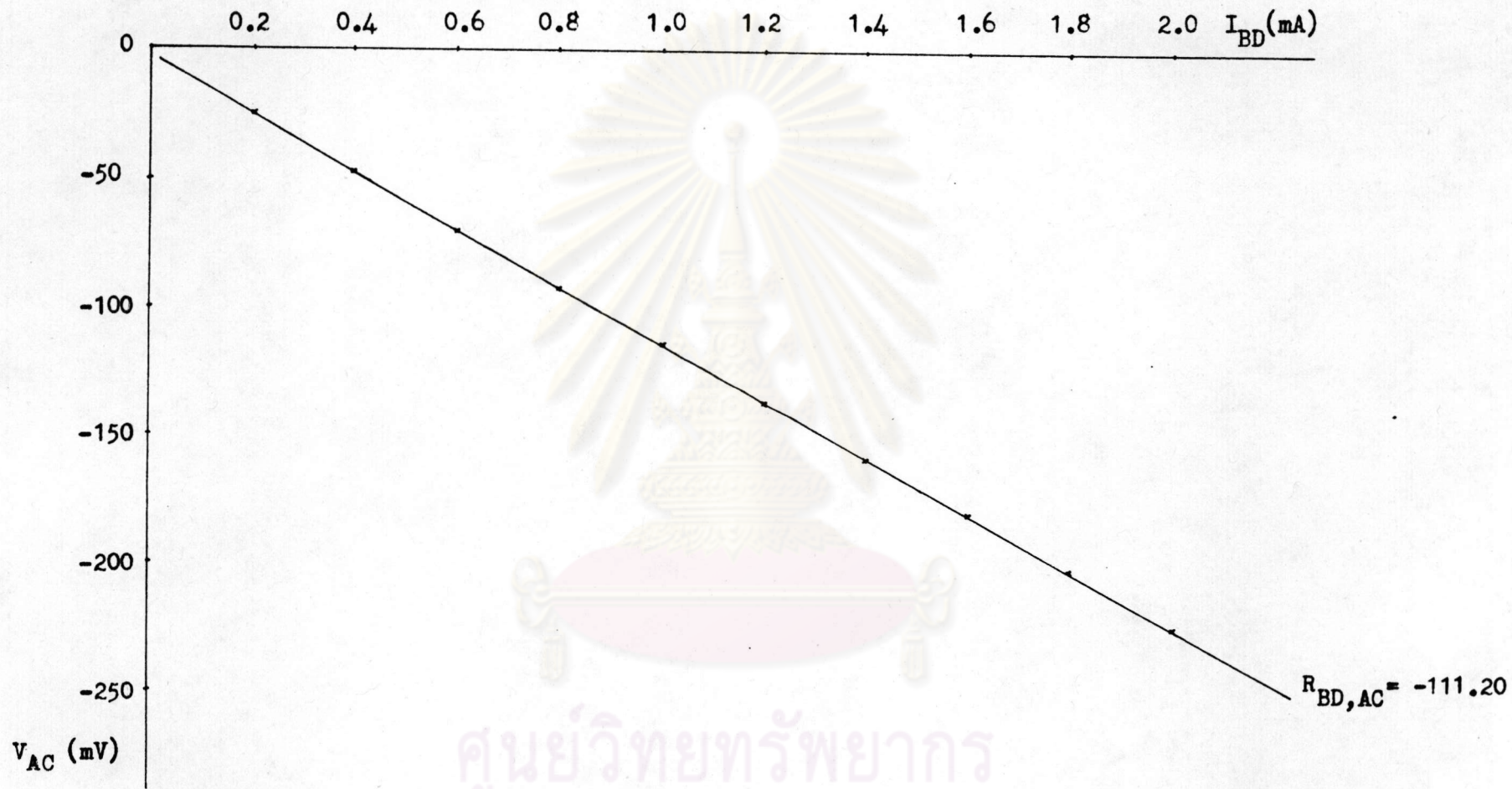
จากตารางที่ 3.18 เขียนกราฟระหว่าง I_{BD} กับ V_{AC} ที่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่าง ๆ สำหรับที่ $B = 0.187$ เทสลาแสดงเป็น ตัวอย่างในรูป (3.12) ได้ความชัน $\frac{V_{AC}}{I_{BD}}$ คือ $R_{BD,AC}$ ที่สนามแม่เหล็ก ความเข้มต่าง ๆ แสดงในตาราง (3.19)

ตารางที่ 3.19 แสดงค่า $R_{BD,AC}$ สนามแม่เหล็กความเข้มต่าง ๆ

B (tesla)	$R_{BD,AC}$ (ohm)
0	-101.99
0.187	-111.20
0.365	-118.56
0.535	-127.49
0.693	-134.97
0.800	-141.88
0.900	-147.14
0.976	-151.34
1.05	-154.39
1.10	-157.59

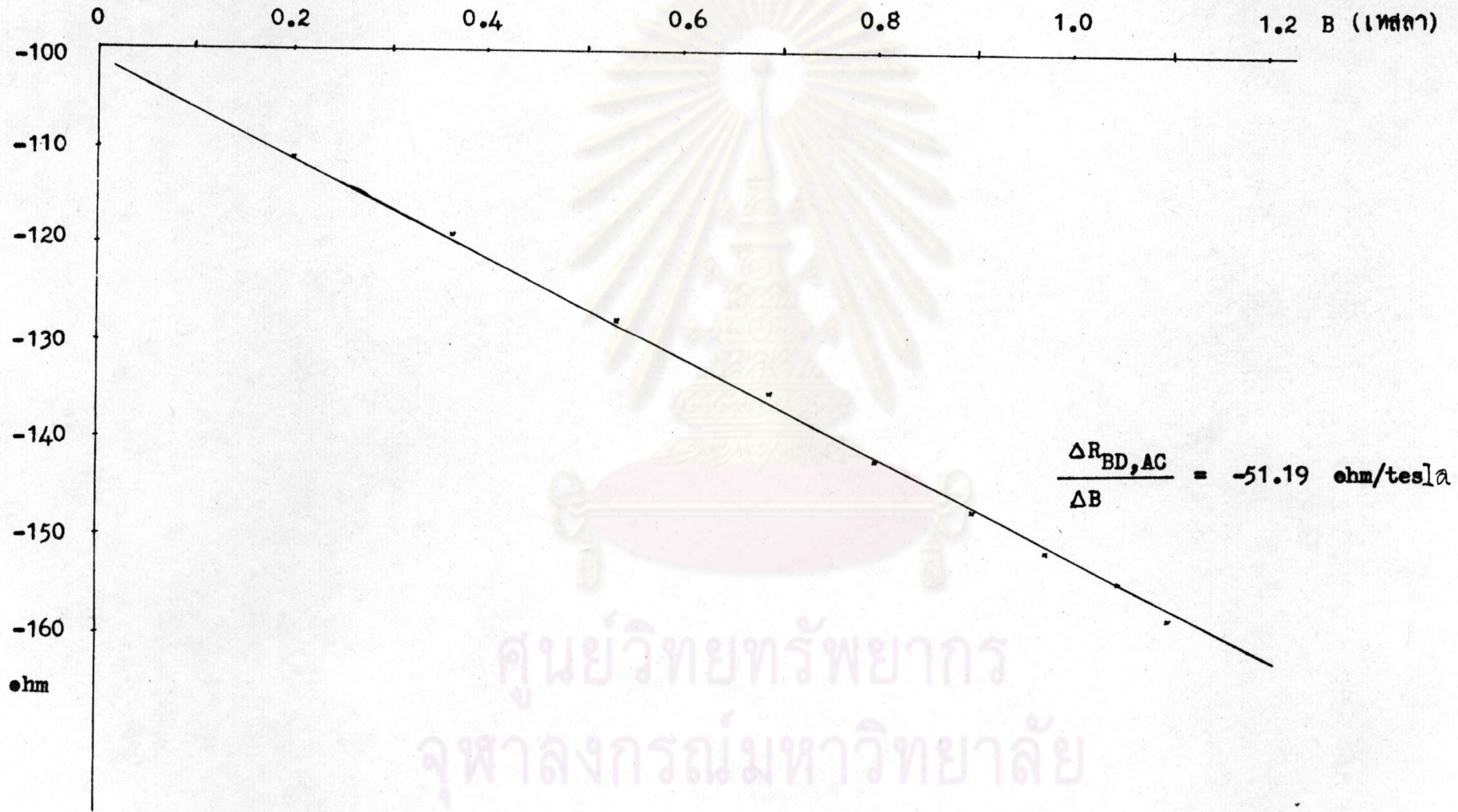
จากตารางที่ (3.19) เขียนกราฟระหว่าง B กับ $R_{BD,AC}$ ซึ่งแสดงในรูปที่ (3.13) ได้ความชัน $\frac{\Delta R_{BD,AC}}{\Delta B} = -51.79 \text{ ohm/testla}$

เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ R_H ได้จากความสัมพันธ์



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ I_{BD} กับ V_{AC} ที่ $B=0,187$ เทสลาอุณหภูมิ 191.7°C

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ B กับ R_{BD,AC} ของผลึก B ที่ 191.7°ซ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$R_H = \frac{b \Delta R_{BD, AC}}{\Delta B} \quad (3.6)$$

แทนค่า $b = 1.003 \pm 10^{-3} \text{ m.}$

$$\frac{\Delta R_{BD, AC}}{\Delta B} = -51.79 \text{ ohm/tesla}$$

จะได้ $R_H = -0.0519 \text{ m}^3/\text{coul}$

จากค่า R_H และ ρ เราสามารถหาค่าสภาพเคลื่อนไ้ของฮอลล์ (μ_H) ได้จากความสัมพันธ์

$$\mu_H \rho = R_H \quad (3.7)$$

แทนค่า $R_H = 0.0519 \text{ m}^3/\text{coul}$

และ $\rho = 87.2 \text{ ohm-cm}$

จะได้ $\mu_H = 595.2 \text{ cm}^2 \text{ Volt}^{-1} \text{ sec}^{-1}$

ผลการทดลองและการคำนวณหาค่า R_H และ μ_H ข้างบนนั้น เป็นของผลึก B ที่อุณหภูมิ 191.7° K เท่านั้น สำหรับผลการทดลองที่อุณหภูมิต่างกัน แสดงในตาราง (3.20)

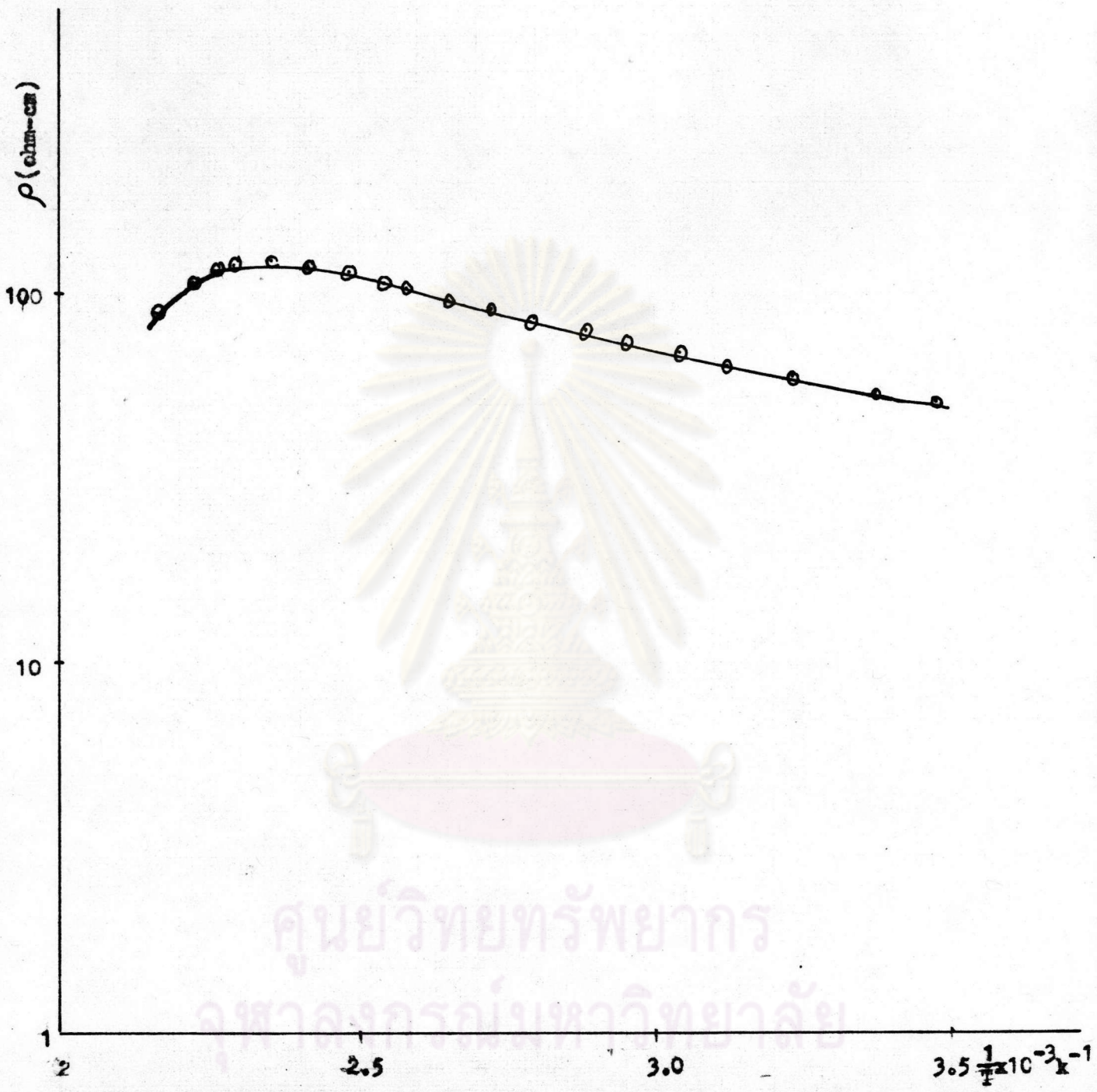
ตารางที่ 3.20 แสดงผลการทดลองวัดค่า R_H และ μ_H ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

t°c	T(K)	$\frac{1}{T} \times 10^{-3} (\text{K}^{-1})$	$\rho (\text{ohm-cm})$	$R_H \frac{\text{m}^3}{\text{coul}}$	$\mu_H \frac{\text{cm}^2}{\text{Volt-sec}}$
14.0	287.0	3.48	49.2	0.1069	2172.57
23.3	296.3	3.37	53.1	0.993	1868.83
36.7	309.7	3.23	59.3	0.1013	1799.50
47.8	320.8	3.12	64.7	0.1024	1584.19
56.4	329.4	3.04	68.7	0.1028	1496.21
66.3	339.3	2.95	74.1	0.1026	1384.85

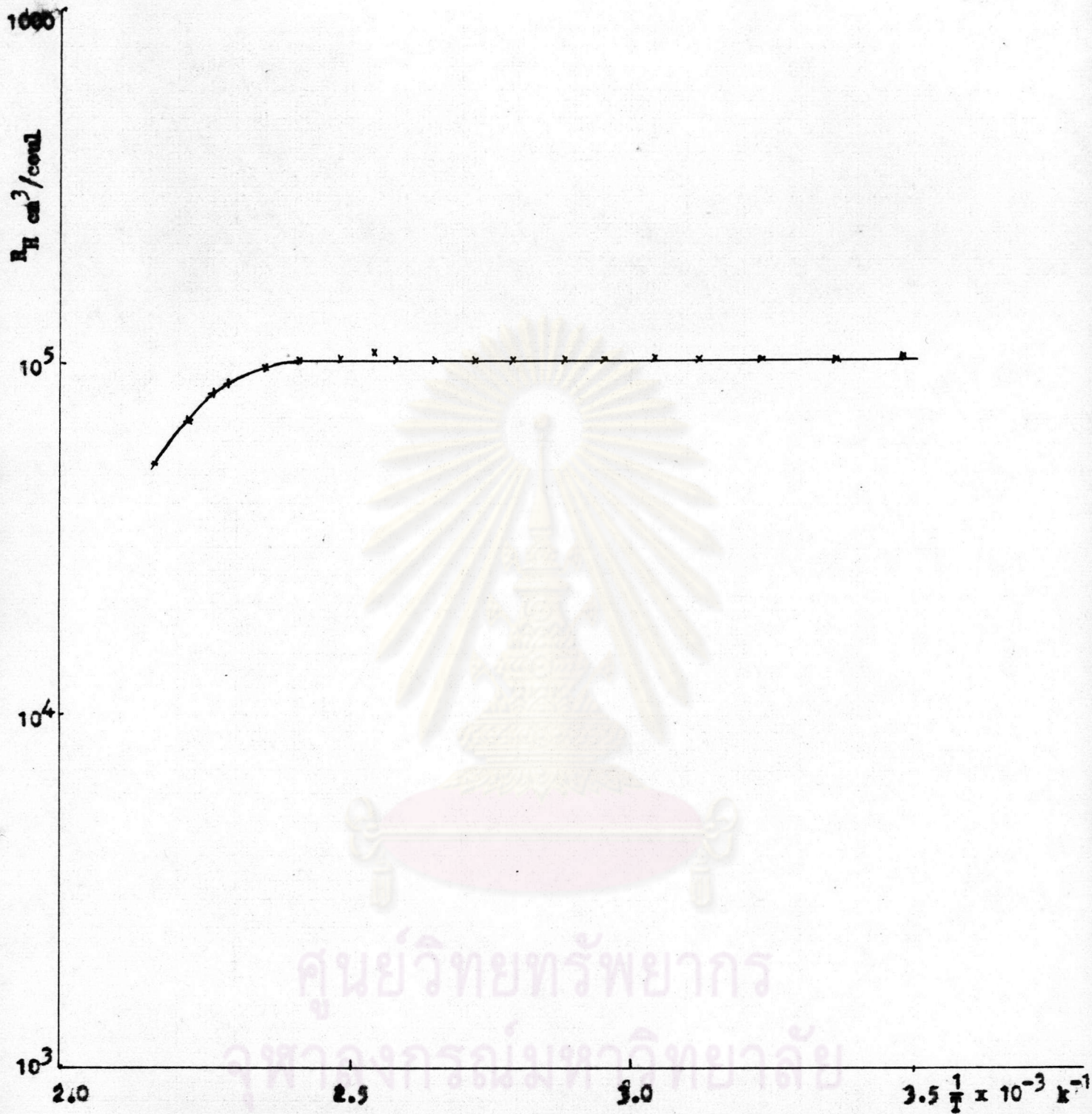
ตารางที่ 3.20 (ต่อ)

$t^{\circ}\text{C}$	T(K)	$\frac{1}{T} \times 10^{-3} (\text{K}^{-1})$	$\rho (\text{ohm-cm})$	$R_H \frac{\text{m}^3}{\text{voul}}$	$\mu_H \frac{\text{cm}^2}{\text{Volt sec}}$
74.8	347.8	2.88	78.9	0.1022	1296.10
84.8	357.8	2.79	84.1	0.1036	1231.66
94.4	367.4	2.72	89.6	0.1019	1138.26
95.5	368.5	2.71	90.7	0.1048	1155.64
104.2	377.2	2.65	95.6	0.1032	1079.22
114.1	387.1	2.58	101.3	0.1042	1028.64
121.0	394.0	2.54	107.2	0.1109	1035.31
130.0	403.0	2.48	113.2	0.1027	907.84
142.5	415.5	2.41	118.5	0.1011	853.16
152.6	425.6	2.35	121.6	0.0960	789.60
163.0	436.0	2.29	120.3	0.0891	741.05
169.7	442.7	2.26	116.0	0.0839	723.17
178.1	451.1	2.22	107.8	0.0691	640.64
191.7	464.7	2.16	87.2	0.0519	595.22

จากตารางที่ (3.20) เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{T}$ กับ $\ln \rho$ และ $\frac{1}{T}$ กับ $\ln R_H$ ในรูปที่ (3.14) และ (3.15) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln T$ กับ $\ln \mu_H$ แสดงในตาราง (3.21) และรูป (3.16) ซึ่งได้ความชัน -2.6 แสดงว่า $\mu \propto T^{-2.6}$



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง ρ กับ $\frac{1}{T}$



รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K_H กับ $\frac{1}{T}$

ตารางที่ 3.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln T$ กับ $\ln \mu_H$

$\ln T$	$\ln \mu$
5.659	7.684
5.691	7.533
5.736	7.495
5.771	7.368
5.797	7.311
5.827	7.233
5.852	7.167
5.880	7.116
5.906	7.037
5.909	7.052
5.933	6.984
5.959	6.936
5.976	6.942
5.999	6.811
6.029	6.749
6.053	6.672
6.078	6.608
6.093	6.584
6.112	6.462
6.141	6.389

ค่าของ R_H มีค่าเป็นลบแสดงว่าพาหะเป็นอิเล็กตรอนจากกราฟระหว่าง $\frac{1}{T}$ กับ $\ln R_H$ รูป (3.15) ในช่วง 287-415.5 K $\ln R_H$ ไม่เปลี่ยนแปลงกับ $\frac{1}{T}$ เป็นช่วงเอ็กซ์คลูชัน

ดังนั้นจะได้ว่าผลึก B เป็นชนิด N สำหรับตั้งแต่ช่วง 415.5K ขึ้นไป $\ln R_H$ เปลี่ยนกับ $K \frac{1}{T}$ ดังนั้น $R_H \propto e^{-\frac{K}{T}}$ ในช่วงนี้เป็นช่วงอินทรินซิก

ในกรณีที่เราเริ่มเข้าในช่วงอินทรินซิก เราประมาณได้ว่าโฮลที่เกิดขึ้นยังมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมด ดังนั้นเราสามารถจะทิ้งโฮลไปได้ ทิศทางเหมือนในกรณีมีพาหะเพียงชนิดเดียวเราสามารถหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n) โดยความสัมพันธ์

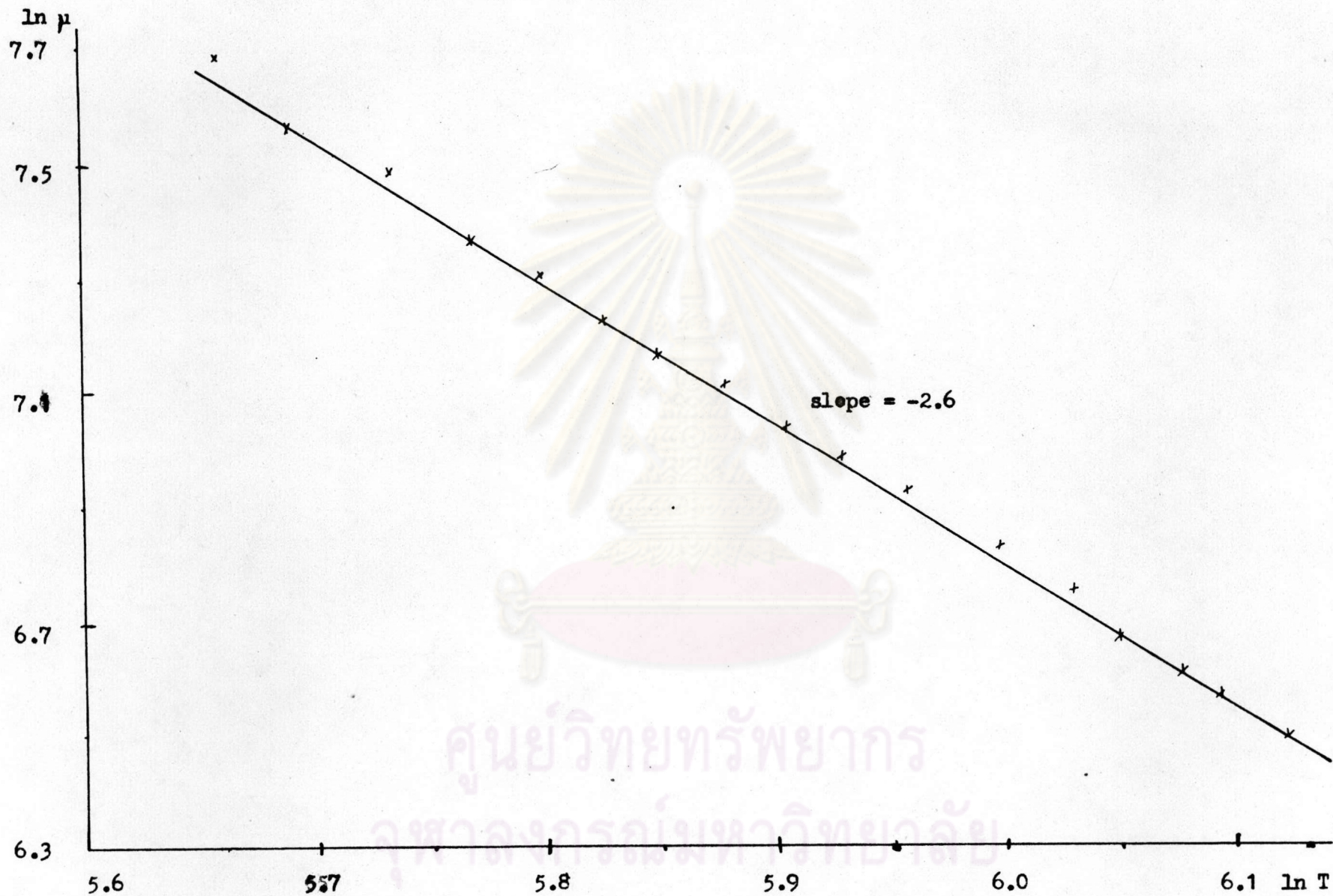
$$R_H = \frac{1}{ne} \quad (3.8)$$

แทนค่า $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ coul}$

จากตาราง (3.20) เราสามารถหาความสัมพันธ์ n กับ $T(K)$ ได้แสดงในตาราง

(3.22) และรูป (3.17) จะเห็นว่า n จะลงในช่วง 287-415.6 K แล้วเริ่มแปรผันกับ $e^{-\frac{K}{T}}$ ในช่วง n คงที่เป็นช่วงเอ็กซ์คลูชัน n มีค่าเฉลี่ย $= (6.04 \pm 0.15) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

ศูนย์วิทยุพยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln T$ กับ $\ln \mu_H$ ของผลึก B

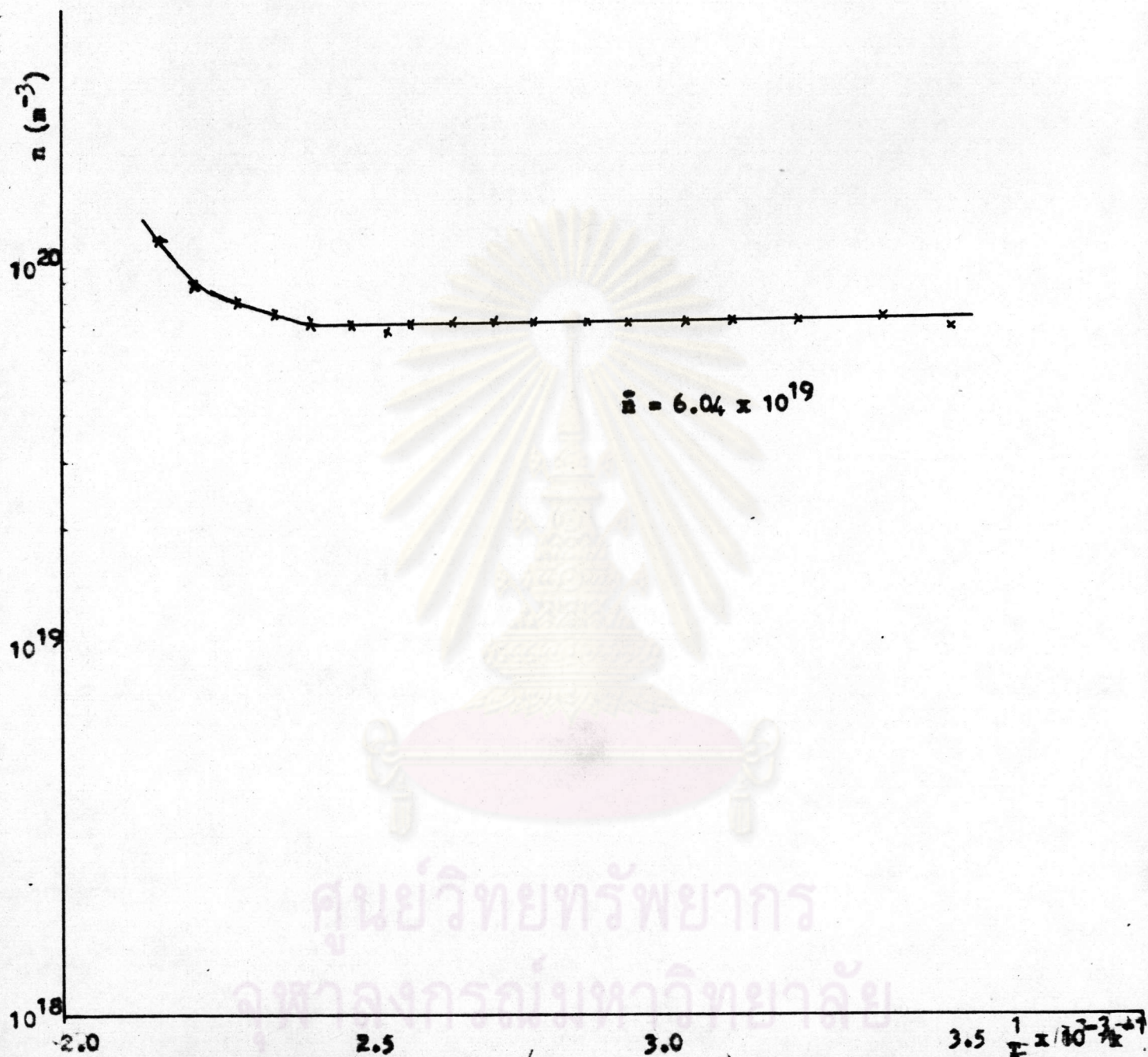
ตารางที่ 3.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง n กับ T และ $\frac{1}{T}$

t	T (k)	$\frac{1}{T} \times 10^{-3} (\text{m}^{-1})$	$n \times 10^{19} (\text{m}^{-3})$
14.0	287.0	3.48	5.85
23.3	296.3	3.37	6.29
36.7	309.7	3.23	6.17
47.8	320.8	3.12	6.10
56.4	329.4	3.04	6.07
66.3	339.3	2.95	6.08
74.8	347.8	2.88	6.10
84.4	357.8	2.79	6.02
94.4	367.4	2.72	6.12
95.5	368.5	2.71	5.95
104.2	377.2	2.65	6.05
114.1	387.1	2.58	5.99
121.0	394.0	2.54	5.62
130.0	403.0	2.48	6.08
142.5	415.5	2.41	6.17
152.6	425.6	2.35	6.50
163.0	436.0	2.29	7.00
169.7	442.7	2.26	7.44
178.1	451.1	2.22	9.03
191.7	464.7	2.16	12.02

ในช่วงอุณหภูมิ 287.0-415.5 K, n เฉลี่ย = $(6.04 \pm 0.15) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

ผลการทดลองการใช้งานของอุปกรณ์วัดความคุมอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิกระเพื่อมไม่เกิน 0.2 K การทดลองเปรียบเทียบการวัด ρ และ R_H แบบธรรมดา กับแบบแวนเคอร์เพาว์ปรากฏว่าค่าที่ได้แตกต่างกันน้อยมาก การทดลองวัด และ R_H ของผลึก B ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิช่วง 14.0°K - 152.6°K อยู่ในช่วงเฮกซ์คลูซีน มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนประมาณ $6.04 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$.
ในช่วงเฮกซ์คลูซีนจากการทดลองได้ว่า $\mu_h \propto T^{-2.6}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.17 ความเข้มข้น n กับ $\frac{1}{T}$ ช่วงอุณหภูมิ 14.0-152.6°K
 n ไม่แปรผันกับ $\frac{1}{T}$ ได้ n คงที่ $6.04 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$