

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค



นายวิโรจน์ อธิธิประทีป
นายศุภชัย สมโนทยาน

ร/พ.
๑๗/๒๕
๒๕๓๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี.....

๖12555307

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชา ฟิลิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

**A SET OF MEASUREMENT FOR MEASURING SEEBECK COEFFICIENTS IN SEMICON-
DUCTING SAMPLE**

Mr. Wirote Itthiprateep

Mr. Supachai Sumanotayan

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
1993

หัวข้อโครงการพิเศษ

ชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

โดย

นายวิโรจน์ อิกธิประทีป

นายศุภชัย สุ่มโนทธาน

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย

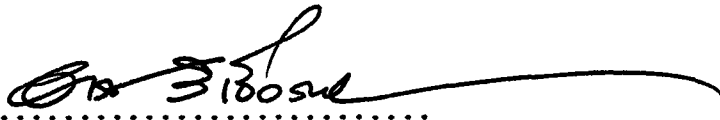
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

25/10

(ผศ. ปรีชา เทียนสมประสงค์)

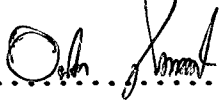
หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการโครงการพิเศษ



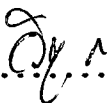
(ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย)

ประธานกรรมการ



(อ.อนนิต จารุณาวีณ)

กรรมการ



(อ.วิชาญ วัฒนทนา)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	ชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค
นักศึกษา	นายวิโรจน์ อภิทธิประทีป นายศุภชัย สุมโนทยาน
อาจารย์ที่ปรึกษา	พศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2536

บทคัดย่อ

ชุดตรวจวัดนี้ใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคในสารตัวอย่างซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำโดยที่ทำให้มีอุณหภูมิแตกต่างกันในชั้นบน และชั้นล่างของสารกึ่งตัวนำ แล้วทำการวัดค่าซีเบคโวลต์เตทระหว่างขั้วทั้งสอง โดยหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค จากการหาความชันของความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีเบคโวลต์เตท กับ ค่าความแตกต่างทางอุณหภูมิในชั้นบนและล่างของสารกึ่งตัวนำ โดยแสดงผลทาง X-Y Recorder ซึ่งค่าที่ได้จะหาที่อุณหภูมิห้อง และ อุณหภูมิที่สูงกว่าได้ (โดยมีวงจรรควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ แบบ Proportional Controller ควบคุมการทำงานของวงจรวอร์ลต์เตทควบคุมกระแส (Voltage Control Current Source) ให้กับเตาขดลวดไฟฟ้า) ซึ่งสามารถใช้วัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคได้ที่อุณหภูมิ 0 ถึง 100 °C และได้ทดลองวัดกับสารโลหะผสมชนิดโคโรเมล และอลูเมล จะมีค่า 30 ถึง 50 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ และ -30 ถึง -45 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$

Special Project Title An set of measurement for measuring Seebeck
Coefficient in Semiconducting Sample

Name Mr.Wirote Itthiprateep
Mr.Supachai Sumanothayarn

Special Project Advisor Asst.Prof.Dr.Aree Wichianchai

Department Applied Physics

Academic Year 1993

Abstract

An set of measurement for measuring Seebeck coefficients in semi-conducting sample . When temperature gradient ΔT is produced across the sample then the Seebeck voltage ΔV is measured across its using a specially designed amplifier circuit. The Seebeck coefficient is obtained from the slope of the plot X-Y Recorder of ΔV vs ΔT .

This set of measurement can measure in room temperature and the higher room temperature (By means of proportional controller to voltage control current source (VCCS) in furnance heater),it has measured metal(Cromel&Alumel) as $35-50 \mu V/^{\circ}C$ and $(-30)-(-40) \mu V/^{\circ}C$ (insequential)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ก็ด้วยความช่วยเหลือ และ เอาใจใส่อย่างยิ่งจาก

ท่านอาจารย์ อารีย์ วิเชียรฉาย	ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ชี้แนะแนวทางในการ
	ทำงานและแนะนำเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง
ท่านอาจารย์ วิจิต ศิริโชติ	ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาด้านทฤษฎีและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง
ท่านอาจารย์ อนุชิต จารุณาวัฒน์	เป็นที่อาจารย์ที่ปรึกษาด้านเทคนิควงจรอิเล็กทรอนิกส์
ท่านอาจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา	อนุญาตให้ใช้เครื่องมือ และหนังสือประกอบการทำงาน
นาย บุญชัย พจนาสมาน	แนะนำเทคนิควงจร
นาย ช่างวิทย์ เดชอัสวง	แนะนำเทคนิควงจร
นาย วัชรพงษ์ ปถมพานิชย์	ช่วยพิมพ์
นาย จักรกฤษณ์ จูเจริญ	ช่วยพิมพ์
นาย อรรถพร กุลธรรมโยธิน	ช่วยซื้ออุปกรณ์
นาย ชินวัฒน์ ทวีทรัพย์แสวง	ช่วยซื้ออุปกรณ์
นาย ภูเบศร์ อุดมทรัพย์	แนะนำทฤษฎีทางไฟฟ้า
นางสาว สุภัทชดา ผาสุข	ให้อุปกรณ์ทำงาน
นางสาว อัมพร โชคชัยตระกูลโพธิ์	แนะนำความรู้ทางวิชาการตลอดสี่ปี

นอกจากนี้ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ วิชาการต่างๆ ให้แก่ผู้เขียนตลอดระยะเวลาสี่ปีที่ผ่านมา จนสามารถนำความรู้ และความสามารถมาใช้ในการทำงานนั้นจนประสบผลสำเร็จ นอกจากนี้ก็ต้องขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ที่เป็นกำลังใจในการทำงานไว้ ณ ที่นี้ด้วย

และบุคคลที่สำคัญที่สุดของผู้เขียนคือ บิดามารดาที่เป็นต้นแบบที่ดีทั้งทางกาย วาจาและใจตลอดจนถึงการเลี้ยงดู อบรม และสั่งสอน จนกระทั่งประสบความสำเร็จในระดับปริญญาตรี

นาย วิโรจน์ อธิธิประทีป

นาย ศุภชัย สุมโนทธาน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.2 วิธีดำเนินการ	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
2. ทฤษฎีและหลักการสนับสนุนโครงการ	4
2.1 ปรากฏการณ์ความร้อนไฟฟ้า	4
2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบค	4
2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์	5
2.1.3 ปรากฏการณ์ธอมสัน	6
2.2 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในวัสดุสารกึ่งตัวนำ	7
2.3 หลักการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล	11
2.3.1 หลักการทำงาน	11
2.3.2 หลักการหาวัดอุณหภูมิ	15
2.4 หลักการควบคุมอุณหภูมิ	21
2.4.1 หลักการควบคุมแบบอนาลอก	21
2.4.2 ตัวขยายสัญญาณที่ผลิตผลาด	23
2.5 วงจรขยายสัญญาณ	29
2.5.1 เครื่องขยายสัญญาณความแตกต่างของขั้วบน และ	
ล่างของสารตัวอย่าง	29
2.5.2 เครื่องขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซีเบค	30

2.6	หลักการสร้างแหล่งกำเนิดความร้อน	36
2.6.1	ส่วนควบคุมอุณหภูมิคงที่	37
2.6.2	ส่วนแหล่งจ่ายพลังงานให้กับขดลวดความร้อน	38
3.	การสร้างชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค	39
3.1	การสร้างส่วนให้พลังงานกับเตา	41
3.2	การสร้างตัวจับสาร	41
3.3	การสร้างส่วนควบคุมอุณหภูมิคงที่	51
3.3.1	การสร้างวงจรขยายตัววัดอุณหภูมิ	51
3.3.2	วงจรควบคุมแบบสัดส่วน	60
3.4	วงจรขยายความแตกต่างอุณหภูมิขั้วบน และล่างของสารตัวอย่าง	61
3.5	วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซีเบค	62
3.6	การประกอบเข้าชุดทั้งหมด	62
4.	การทดสอบส่วนต่าง ๆ ตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และวิจารณ์	65
4.1	ผลการทดสอบวงจรควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อน	65
4.2	การทดสอบวงจรขยาย	66
4.3	วิธีทดลอง และผลการทดลอง	69
5.	สรุปผลการทดลอง และวิจารณ์	74
	เอกสารอ้างอิง	77
	ภาคผนวก	78

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดต่าง ๆ ที่นิยมใช้กัน	13
4.1	ผลการทดสอบอัตราขยายที่สร้างขึ้น	68
4.2	ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิต่างๆ	72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การทดลองปรากฏการณ์ซีเบค	5
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุต่าง ๆ	6
2.3 ปรากฏการณ์ซีเบคในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	9
2.4 ปรากฏการณ์ซีเบคในสารกึ่งตัวนำชนิดพี	10
2.5 แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าซีเบค	11
2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าซีเบค	12
2.7 โครงสร้างพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบง่าย ๆ ที่เหมาะ สำหรับการวัดอุณหภูมิในเตาไฟฟ้า	13
2.8 วิธีที่นิยมใช้ในการป้องกันเทอร์โมคัปเปิ้ล	14
2.9 แสดงโครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิ้ลในปัจจุบัน	15
2.10 หลักการพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิ้ล	16
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ลต่าง ๆ	17
2.12 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิ	18
2.13 แสดงเทอร์โมคัปเปิ้ลที่เกิดขึ้นระหว่างสายวัดกับเทอร์โมคัปเปิ้ล	19
2.14 การรักษาอุณหภูมิที่รอยต่ออ้างอิงให้คงที่ โดยแช่ในน้ำแข็ง	20
2.15 การชดเชยศูนย์ของค่า	21
2.16 แสดงแผนภาพของระบบควบคุมพารามิเตอร์	22
2.17 ก ค่าความแตกต่างของการขยายสัญญาณ	23
2.17 ข เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบ inverting summer	24
2.18 transfer curve ของตัวควบคุมแบบได้สัดส่วน	26
2.19 แสดงแผนภาพของระบบควบคุมพารามิเตอร์	27
2.20 การวัดสัญญาณของชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค	30
2.21 วงจรขยายสัญญาณความต่างสามสเตจ	31
2.22 differential with two op amp	32
2.23 วงจรขยายสัญญาณแยกพิจารณาทีละตัว	32
2.24 differential amplifier with one op amp	33

2.25	วงจรขยายกลับเฟส	35
2.26	ส่วนประกอบของส่วนให้พลังงานกับเตา	36
2.27	วงจรเครื่องควบคุมกระแสคงที่	37
2.28	วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง	38
3.1	แสดงการทดลองแนวความคิดเบื้องต้นของการวัดสัมประสิทธิ์ ซีเบคอย่างง่าย	39
3.2	ผลการทดสอบแนวความคิดเบื้องต้น	40
3.3	แสดงวงจรทดสอบเตา	42
3.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา	42
3.5	วงจรควบคุมกระแสคงที่	43
3.6	กำลังสูญเสียใน FET เมื่อใช้ FET 1 ตัว	44
3.7	การต่อ FET ขนานกัน	45
3.8	กำลังสูญเสียใน FET เมื่อใช้ FET 6 ตัว	46
3.9	เปรียบเทียบกำลังสูญเสียเมื่อใช้ FET 1 ตัว และ FET 6 ตัว	47
3.10	วงจรแหล่งจ่ายไฟตรง	47
3.11	รูปทรงเตาไฟฟ้า	49
3.12	หัวจับสาร	51
3.13	ส่วนประกอบของวงจรขยายสัญญาณอุณหภูมิ	52
3.14	วงจรชุดเซ็นเซอร์อุณหภูมิศูนย์องศา	53
3.15	วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน	54
3.16	วงจรขยายสัญญาณ	55
3.17	วงจรรวมของส่วนขยายสัญญาณหัววัดอุณหภูมิ	56
3.18	การทดสอบวงจรที่สร้างขึ้น	57
3.19	ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดัน	58
3.20	วงจรควบคุมแบบได้สัดส่วน	60
3.21	วงจรขยายสัญญาณความแตกต่างอุณหภูมิขั้วบนและ ล่าง ของสารตัวอย่าง	61
3.22	วงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซีเบค	62
3.23	วงจรแหล่งกำเนิดแรงดัน +15 V และ -15 V	63

3.24	วงจรรวมส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค	64
4.1	ผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิ	65
4.2	ทดลองการต่อวงจรทดสอบอัตราขยาย	66
4.3	ตัวอย่างกราฟที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายจากข้อมูลดิบ	67
4.4	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง	69
4.5	ตัวอย่างแสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจากข้อมูลดิบ	71
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค กับ อุณหภูมิ	73
5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า สัมประสิทธิ์ซีเบค กับอุณหภูมิ	75

บทที่ 1

บทนำ

ชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck Measurement) เป็นชุดตรวจวัดลักษณะสมบัติของสารที่สำคัญ ซึ่งอาศัยหลักการทางฟิสิกส์เชิงความร้อนพื้นฐาน มาใช้ประกอบการสร้างเครื่องมือวิเคราะห์ขึ้น

โครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาและออกแบบสร้างชุดตรวจวัดเครื่องมือดังกล่าวขึ้น โดยทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทดสอบ เมื่อทำให้สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิแตกต่างกันที่ขั้วบน และขั้วล่างจะทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าซีเบค ซึ่งจะหา

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค} = \text{แรงดันไฟฟ้าซีเบค} / \text{อุณหภูมิที่แตกต่างกัน}$$

โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิที่ต้องการจะวัดในการสร้างเครื่องมือดังกล่าวให้สามารถใช้งานได้จำเป็นต้องสร้างส่วนประกอบที่จำเป็น คือ เตาความร้อน, เครื่องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่, เครื่องขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซีเบค และเครื่องขยายสัญญาณความแตกต่างอุณหภูมิของขั้วบนและขั้วล่างของสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น ซึ่งค่าที่เราวัดได้จะทำให้เราสามารถหาพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- หาพลังงานการกระตุ้น ซึ่งเป็นระดับพลังงานของสารเจือที่อยู่ห่างจากแถบความนำถ้าสารนั้นเป็นชนิดเอ็น หรือห่างจากแถบวาเลนซ์ ถ้าสารนั้นเป็นชนิดพี
- หาค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระที่อยู่ในแถบของความนำ หรือแถบวาเลนซ์
- บอกชนิดสารกึ่งตัวนำว่าเป็นชนิดพี หรือชนิดเอ็น ดูจากค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบคว่าเป็นบวกหรือลบ ตามลำดับ

จากที่กล่าวมาเป็นเพียงประโยชน์บางประการ จากการวัดด้วยชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ซึ่งขึ้นอยู่กับการนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์และนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเครื่องมือวัดขึ้นใช้เอง เพื่อนำมาใช้เป็นชุดศึกษาและทดลองในห้องปฏิบัติการของฟิสิกส์ของของแข็ง ซึ่งเป็นวิชาของนักศึกษาปีที่ 3-4 ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
2. เพื่อศึกษาขบวนการสร้าง การวิเคราะห์ปัญหา และการแก้ปัญหาที่เป็นอุปสรรคในการสร้างเครื่องมือวัด
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาขบวนการเกิดแรงดันไฟฟ้าซีเบค และความแตกต่างของอุณหภูมิของชั้นบน และล่างของสารกึ่งตัวนำ ทั้งที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิที่ต้องการ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของสารกึ่งตัวนำที่ต้องการวัด
2. ออกแบบสร้างเตา และหัวจับสาร
3. ออกแบบสร้างและทดสอบส่วนชชสาสัณญาณดังนี้
 - แรงดันไฟฟ้าซีเบค
 - ความแตกต่างอุณหภูมิของชั้นบนและล่างของสารกึ่งตัวนำ
4. ออกแบบสร้างและทดสอบเครื่องควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่
5. นำส่วนประกอบที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกันแล้วทำการปรับแต่งให้เหมาะสม
6. ทดลองเครื่องที่สร้างขึ้น นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน
7. หาสาเหตุของความคลาดเคลื่อนแล้วปรับปรุงให้ดีขึ้น
8. สรุปผลและปัญหาในการสร้างเพื่อนำไปปรับปรุงต่อไป

ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้เรียนรู้และแก้ปัญหาในระหว่างการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดขึ้นใช้เอง อีกทั้งเป็นจุดเริ่มต้นในการสร้างชุดตรวจวัดให้กับห้องปฏิบัติ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ เพื่อให้นักศึกษาชั้นปีที่ 3-4 และผู้ที่สนใจได้ใช้ตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ของสสารที่ต้องการได้

นอกจากนี้ยังได้เรียนรู้การนำเสนอผลงานที่ได้ทำการศึกษา เช่นการนำเสนอโดยการอภิปราย และนำเสนอด้วยเอกสาร

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่สนับสนุนโครงการงาน

2.1 ทฤษฎีปรากฏการณ์ความร้อนไฟฟ้า (Thermoelectric effect)

ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริก เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้า และความร้อน มีด้วยกัน 3 ชนิด คือ

1. Seebeck effect
2. Peltier effect
3. Thomson effect

2.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect)

เมื่อเรานำโลหะต่างชนิดกัน 2 ชนิดมาประกบเป็นวงจรปิด และถ้าอุณหภูมิที่รอยต่อมีความแตกต่างกัน 2 แห่ง คือ T_1 และ T_2 จะเกิดความต่างศักย์ที่แปรตรงกับค่า $T_1 - T_2$ เราเรียกความต่างศักย์นี้ว่า แรงความร้อนไฟฟ้า (Thermoelectromotive Force (α_{ab}))

$$V_{ab} = \int \alpha_{ab} (T) dT \quad (2.1)$$

$$\text{หรือ } dV_{ab}/dT = \alpha_{ab}$$

โดยที่ α_{ab} เรียกว่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck Coefficient)

2.1.2 ปรากฏการณ์เพลเทียร์(Peltier effect)

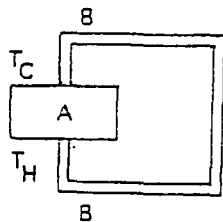
เมื่อเรานำโลหะ 2 ชนิด มาต่อเป็นวงจรปิดเช่นเดียวกับในรูปที่ 2.1 และถ้าควบคุมอุณหภูมิวงจรนี้ให้คงที่ แล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลในวงจร ณ ที่รอยต่อของโลหะเหล่านี้จะเกิดการดูดกลืนหรือคายความร้อน ปรากฏการณ์นี้เป็นชนิด Reversible กล่าวคือ ถ้าเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า การดูดกลืนก็จะกลายเป็นการคายความร้อนหรือกลับกัน ถ้าให้กระแสไฟฟ้า $I(A)$ ไหลจาก a ไปสู่ b และที่รอยต่อนั้น เกิดความร้อนขึ้น(คายความร้อน) ปริมาณความร้อนนั้นคือ

$$Q = \pi_{ab} I \quad (2.2)$$

โดยที่ π_{ab} เรียกว่า สัมประสิทธิ์เพลเทียร์(Peltier coefficient)

สัมประสิทธิ์เพลเทียร์ มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ซีเบค ดังนี้

$$\pi_{ab} = \alpha_{ab} T \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.1 การทดลองปรากฏการณ์ซีเบค

2.1.3 ปปรากฏการณ์ซีมสัน (Thomson effect)

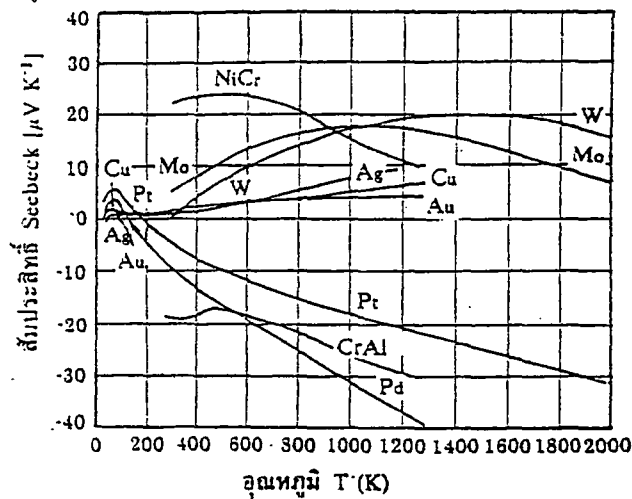
เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้า $I(A)$ เข้าสู่เส้นโลหะที่ปลายทั้งสองข้าง มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ΔT จะเกิดการคาย หรือดูดความร้อนปริมาณ $I\Delta T$ เราเรียกว่าปรากฏการณ์ซีมสันและค่าสัมประสิทธิ์ซีมสัน ซึ่งเป็นค่าคงตัวของวัสดุหนึ่งๆ (แตกต่างกับ α และ π ซึ่งเกี่ยวข้องกับรอยต่อของวัสดุสองชนิด) จะมีค่าเป็นบวก ถ้าเกิดการคายความร้อน โดยกระแสไหลจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำ

ค่าสัมประสิทธิ์ซีมสัน มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ดังนี้

$$T(d\alpha_{ab}/dT) = \pi_{ab}$$

$$\text{หรือ } \alpha_{ab} = \int (\pi_{ab}/T)dT - \int (\pi_{ba}/T)dT \quad \text{----- (2.4)}$$

ความสัมพันธ์นี้ เรียกว่า เคลวิน (Kelvin Relation)



รูปที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุต่างๆ

จากสมการที่ 2.4 จะสังเกตเห็นได้ว่า α_{ab} เป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับรอยต่อของโลหะ 2 ชนิด และสามารถเขียนได้ในรูปของผลต่างของ α_a และ α_b ซึ่งเป็นปริมาณที่เกี่ยวข้องกับโลหะทั้ง 2 ถ้าให้ว่า

$$\alpha_a = \int (\alpha_a/T) dT \quad \alpha_b = \int (\alpha_b/T) dT \quad \text{-----}(2.5)$$

จะเขียนสมการที่(2.4) ได้ใหม่ว่า

$$\alpha_{ab} = \alpha_a - \alpha_b$$

จากความสัมพันธ์เหล่านี้จึงกล่าวได้ว่า สมการที่ (2.5) ก็คือนิยามของค่าสัมบูรณ์สัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุ a และ b นั้นเอง รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของวัสดุต่างๆ

2.2ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริกในวัสดุสารกึ่งตัวนำ

ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ด้านความร้อน และ ด้านไฟฟ้าในเวลาเดียวกัน โดยมีพลังงานจลน์และระดับเฟอร์มิของอิเล็กตรอนเป็นตัวเชื่อมโยงความสัมพันธ์ เรียกว่าปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric effect) ในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ คือ ปรากฏการณ์ซีเบค

2.2.1 ปรากฏการณ์ซีเบค

ถ้านำโลหะหรือสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด มาต่อสัมผัสกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3(ก) และทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิที่รอยสัมผัสนั้น ΔT จะก่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{TE}) ขึ้นที่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง เราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ปรากฏการณ์ซีเบค และเรียก V_{TE} ว่า ศักดาไฟฟ้าทางความร้อน (Thermoelectric Potential) โลหะนิยมถูกนำไปใช้งานประยุกต์เป็นเทอร์โมคัปเปิ้ล โดยอาศัยปรากฏการณ์นี้

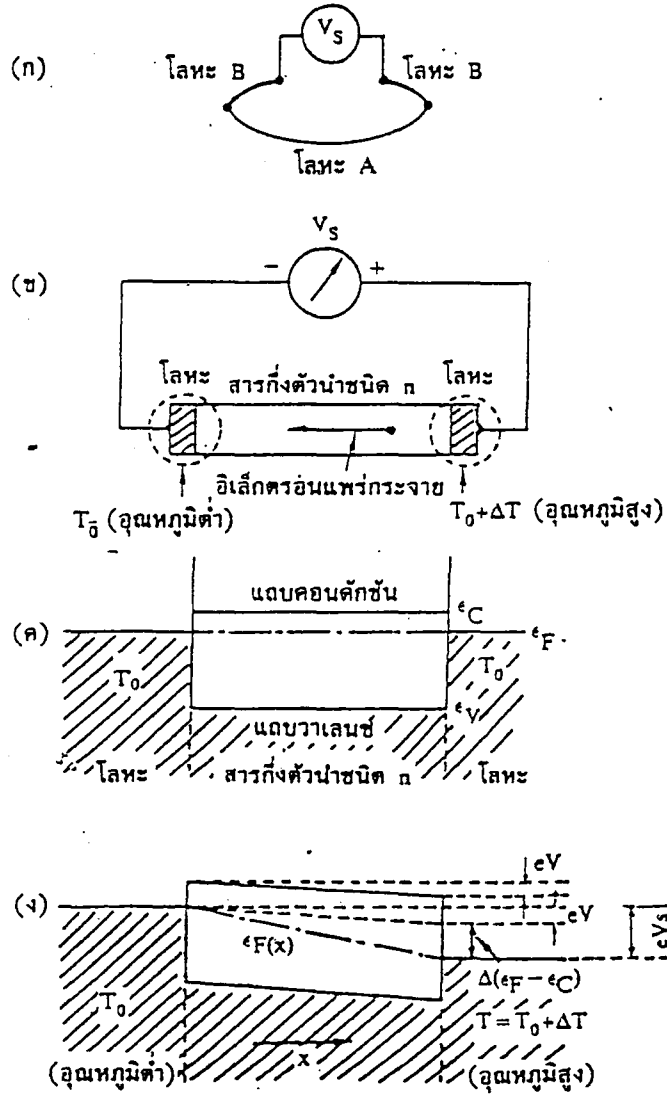
ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (α) มีนิยามดังนี้

$$V_{TE} = \alpha \Delta T \quad \text{-----}(2.6)$$

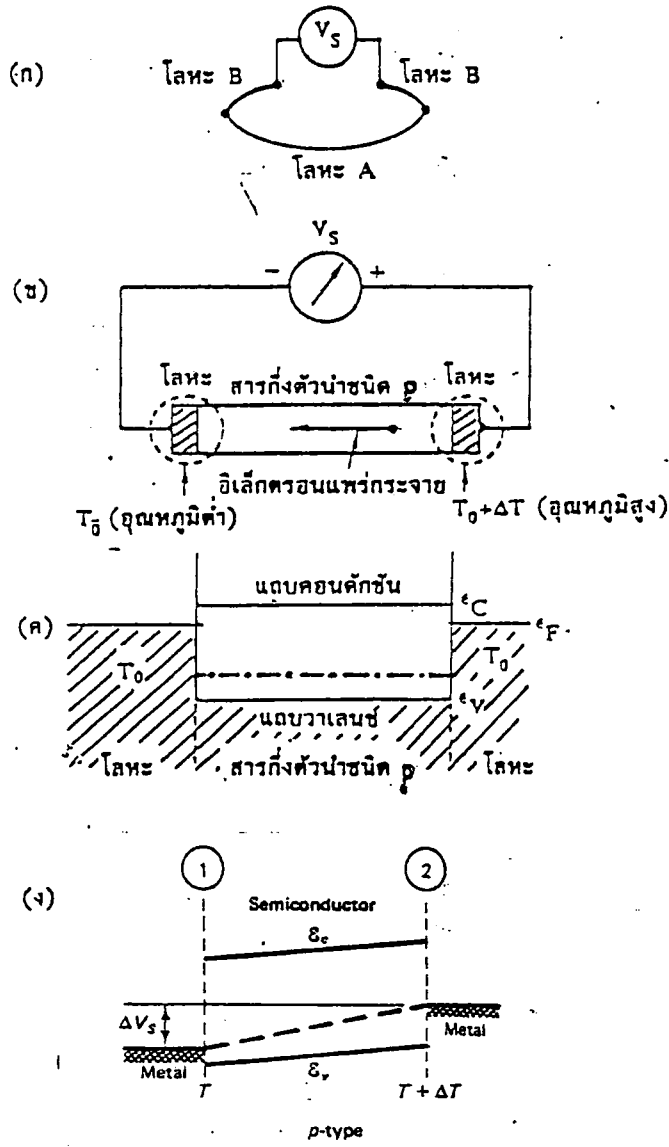
ตามปกติค่า V_{∞} ของสารกึ่งตัวนำจะสูงกว่าของโลหะ ทำให้การวัดค่า α ของสารกึ่งตัวนำกระทำได้ง่าย

ในรูปที่ 2.3(ข) ที่ปลายทั้งสองข้างของสารกึ่งตัวนำชนิด n มีโลหะ (ชนิดเดียวกัน) 2 ชั้น ติดสัมผัสอยู่ และสมมติว่าที่ปลายทั้งสองข้างนี้มีอุณหภูมิแตกต่างกันเป็น ΔT ถ้าอุณหภูมิของแท่งสารกึ่งตัวนำ อยู่ในย่านที่ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระเพิ่ม แบบเอ็กโปเนนเชียลกับอุณหภูมิที่ด้านปลายของสารกึ่งตัวนำที่ร้อนกว่าจะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากกว่าด้านเย็น ดังนั้น อิเล็กตรอนก็จะพยายามแพร่กระจายจากด้านร้อนไปสู่ด้านเย็น เมื่อเป็นเช่นนี้ จะทำให้ด้านเย็นมีประจุลบค้างอยู่มากขึ้น และทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้น สนามไฟฟ้านี้จะคอยผลการแพร่กระจายมาของอิเล็กตรอน และระบบก็จะอยู่ในสภาพสมดุล ดังนั้นในรูปที่ 2.3(ข) จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าที่มีเครื่องหมายดังแสดงในรูป แต่ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิด p พาหะข้างมากคือโฮล ซึ่งจะไหลจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้ขั้วของแรงดันไฟฟ้าสลับกับกรณีชนิด n จากปรากฏการณ์นี้ ถ้าดูเครื่องหมายของแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เราวิเคราะห์ได้ว่า สารกึ่งตัวนำเป็นชนิด n หรือ p

สารกึ่งตัวนำที่ชนิดต่าง ๆ เมื่อทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทั้งสองด้านของสาร จะทำให้เกิดค่าแรงดันซีเบค และนำค่าที่ได้มาหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ซึ่งนำไปใช้ประโยชน์ในการหาค่าต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ เช่น ชนิดของสารว่าเป็นชนิด n -type หรือ p -type , ค่าสภาพคล่องทางไฟฟ้า (μ) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ปรากฏการณ์ซีเบคในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



รูปที่ 2.4 ปรากฏการณ์ซีเบคในสารกึ่งตัวนำชนิดพี

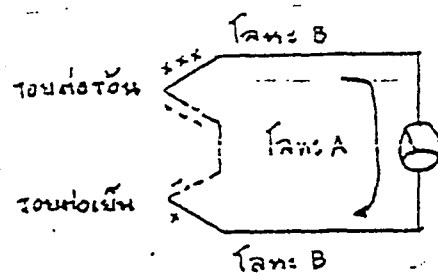
2.3 หลักการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple measuring Temperature)

เทอร์โมคัปเปิล เป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่สุด ในการวัดอุณหภูมิที่สูงกว่า 150°C ขึ้นไป ซึ่งงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักต้องเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิสูง ๆ เหล่านั้น เช่น ในการชุบเหล็กกล้า จะต้องให้ความร้อนแก่เหล็กกล้าจนมีอุณหภูมิประมาณ 780°C แล้วรักษาอุณหภูมินี้ไว้ชั่วขณะหนึ่ง จากนั้นจึงจุ่มลงไปใต้น้ำให้เย็นลงทันทีทันใด โครงสร้างของเนื้อโลหะจะกลายเป็นผลึกที่มีความดันสูง และมีความแข็งแรงแรงมาก เรียกว่า มาร์เทนไซด์ (martenside) จุดสำคัญของขบวนการชุบแข็งนี้ ก็คือการรักษาอุณหภูมิที่ 780°C นี้ให้ถูกต้องมากๆ มิฉะนั้นเหล็กกล้าที่ได้ก็จะไม่แข็งอย่างที่ต้องการ งานแบบนี้เหมาะกับเทอร์โมคัปเปิลเป็นอย่างมาก

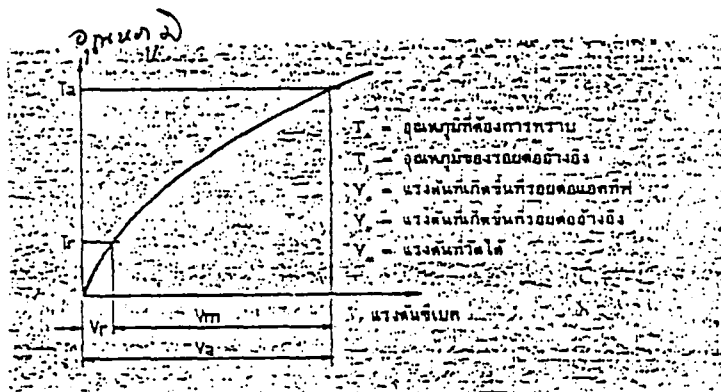
2.3.1 หลักการทำงาน

เทอร์โมคัปเปิลมีประวัติค่อนข้างเก่าแก่ คือถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2364 โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ โทมัส โจฮานน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) ได้ค้นพบว่า เมื่อต่อโลหะ 2 ชนิด เข้าด้วยกันตามรูปที่ 2.5 ให้มีรอยต่อระหว่างโลหะ 2 ชนิดนี้ 2 แห่ง และทำให้รอยต่อทั้งสองนี้มีอุณหภูมิต่างกันจะเกิดกระแสไฟฟ้าขนาดเล็ก ไหลภายในวงจรร การที่เกิดกระแสไฟฟ้าไหลได้นี้

เนื่องจากเกิดมีความต่างศักย์เกิดขึ้นที่รอยต่อแต่ละแห่งและมีขั้วตรงข้ามกัน โดยแรงดันที่รอยต่อร้อนจะมีค่าสูงกว่ารอยต่อเย็น ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นบนรอยต่อของโลหะนี้ เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าซีเบค (Seebeck EMF) ผลต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้เกิดเป็นแรงดันจำนวนหนึ่งที่ทำให้กระแสไหลได้



รูปที่ 2.5 แสดงการเกิดแรงดันไฟฟ้าซีเบค



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันที่เบค

แรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก โดยปกติจะมีค่าประมาณ 0.2-0.3 มิลลิโวลต์ เท่านั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่นำมาจับคู่กันด้วย ได้มีการทดลองจับคู่โลหะชนิดต่างๆ เพื่อทำเป็นเทอร์โมคัปเปิ้ลสำหรับงานแต่ละแบบไว้หลายคู่ แต่ละคู่จะเรียกชื่อตามอักษรภาษาอังกฤษ

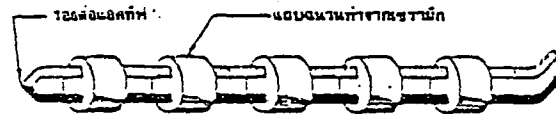
จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด N ที่สร้างจากโลหะผสมของนิเกิล, โครเมียม, ซิลิกอน (นิโครซิล) นั้นมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิดีเยี่ยม มีอายุการใช้งานยาวนานที่อุณหภูมิสูงให้แรงดันสูงกว่าเทอร์โมคัปเปิ้ลอุณหภูมิสูง ๆ ด้วยกัน และราคาถูกมาก ทำให้ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รอยต่อของเทอร์โมคัปเปิ้ลและแรงดันผลลัพธ์ที่ได้นั้นไม่ได้เปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้นแต่จะคล้ายแบบพาราโบลา (Parabolic cone) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 บรรดาผู้ผลิตจึงแนบตารางความสัมพันธ์ของแรงดันประจำตัวของเทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละชนิดให้ผู้ใช้ทราบด้วย ดังตารางในภาคผนวกซึ่งเป็นตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 0-1000 °C

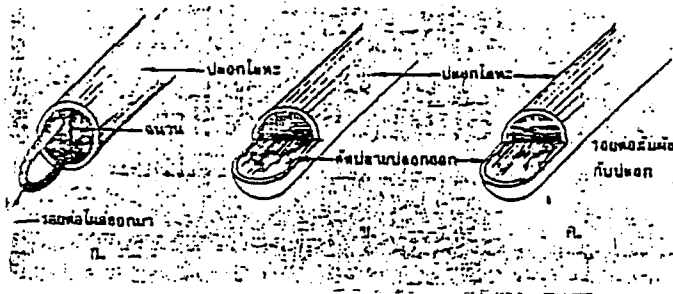
ตารางที่ 2.1 เทอร์โมคัปเปิ้ลต่าง ๆ ที่นิยมใช้กัน

สัญลักษณ์	โลหะที่ใช้	อ่านอุณหภูมิ	ข้อดี ข้อเสีย
S	โรเดียม vs พลาตินัม 10 %	0-1400 °C	มีเสถียรภาพสูง
R	โรเดียม vs พลาตินัม 13%	0-1400 °C	เช่นเดียวกับ S
J	เหล็ก vs ทองแดง-นิเกิล (คอนสแตนตัน)	0-800 °C	จะเกิดสนิมเหล็กขึ้น ถ้าไม่มีการป้องกัน
K	เกิล, โครเมียม (โครเมล) vs นิเกิล, อลูมิเนียม (อลูเมล)	0-1100 °C	เหมาะกับบรรยากาศ ที่มีการออกซิไดซ์
T	ทองแดง vs ทองแดง, นิเกิล	-200 - 400 °C	นิยมใช้กับอุณหภูมิต่ำ- กว่าศูนย์องศาจนถึง อุณหภูมิต่ำ
E	นิเกิล, โครเมียม (โอมเมล) vs ทองแดง, นิเกิล	0-800 °C	เที่ยงตรงและมีเสถียร ภาพตลอดจนราคาถูก
N	นิเกิล, โครเมียม, ซิลิกอน (นิโครซิล) vs นิเกิล, ซิลิกอน (นิซิล)	0-1250 °C	มีเสถียรภาพสูงที่ อุณหภูมิสูง

เทอร์โมคัปเปิ้ลสำหรับอุณหภูมิสูง ๆ ที่ใช้งานจริงมีรูปร่างต่าง ๆ กันแบบที่ง่ายที่สุดเป็นลวดเส้นเล็ก ๆ สองเส้นที่ร้อยผ่านฉนวนที่เป็นเซรามิค แล้วเชื่อมปลายให้ติดกัน ดังรูปที่ 2.7 เทอร์โมคัปเปิ้ลแบบนี้ใช้ในเตาเผาเครื่องเคลือบดินเผาขนาดเล็กๆ ได้ แต่สำหรับการวัดอุณหภูมิในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง หรือเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี เช่น ไอของสารเคมี โลหะที่หลอมละลาย หรือเปลวไฟ แล้วจำเป็นต้องหุ้มด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล ด้วยหลอดโลหะที่บรรจุสารที่เป็นฉนวนไฟฟ้า แต่นำความร้อนได้ดี ไว้ระหว่างกลางให้เทอร์โมคัปเปิ้ลติดตั้งอยู่หนาแน่นกับปลอกโลหะนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 โครงสร้างพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบง่าย ๆ ที่เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิในเตาอบไฟฟ้า



รูปที่ 2.8 วิธีที่นิยมใช้ในการป้องกันเทอร์โมคัปเปิ้ล ในสภาพแวดล้อมที่มีการกักความร้อนสูงหรือที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี

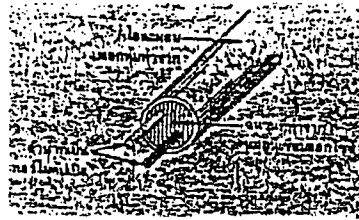
จะเห็นว่าวิธีติดตั้งอยู่ 3 แบบ คือ ในรูปที่ 2.8 (ก) จะโผล่ส่วนปลายที่เป็นรอยต่อโลหะทั้งสองโผล่ออกมา แบบนี้จะสนองต่ออุณหภูมิเร็ว แต่ไม่สามารถทนการกักความร้อนจากปฏิกิริยาเคมีได้

วิธีที่ 2 แสดงในรูปที่ 2.8 (ข) คือ การหุ้มรอยต่อทั้งหมดไว้ในหลอดซึ่งป้องกันการเสียหายได้ แต่การตอบสนองอุณหภูมิจะช้าลง เพราะปลอกหุ้มและฉนวนนำความร้อนได้ช้า ซึ่งแก้ไขด้วยการติดตั้งในรูปที่ 2.8 (ค) คือ รอยต่อถูกยึดติดกับด้านในของปลอกหุ้ม จึงได้ทั้งความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และป้องกันการเสียหายได้ดี

โดยทั่วไปแล้ว ในปัจจุบันนี้ปลอกหุ้มทำมาจากเหล็กสแตนเลส หรือเซรามิก อย่างไรก็ตามในยุคหลัง ๆ นี้ได้เปลี่ยนมาใช้โลหะผสมพิเศษ เช่น นิกโครซิล (Nickel-Chromium Silicon)

เพราะมีความเหมาะสมในด้านสมบัติการขยายตัวของอุณหภูมิระหว่างปลอกหุ้มและโลหะที่ใช้ทำตัวเทอร์โมคัปเปิ้ล และเป็นการลดค่าความเค้นอันเนื่องมาจากความร้อนให้เหลือน้อยที่สุด

ดร. โนแอล เบอร์เลส นักวิทยาศาสตร์ชาวออสเตรเลียได้เผยแพร่ในการปรับปรุงโลหะผสมที่ใช้ทำปลอกหุ้มที่ เรียกว่า นิโครเบล (Ni-crobell) และเป็นผู้รับผิดชอบในการพัฒนาโครงสร้างที่มีแร่เป็นฉนวน และปลอกหุ้มเป็นโลหะ (Mineral Insulated, Metal Sheath หรือ MIMS) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งได้กลายเป็นโครงสร้างยอดนิยมของเทอร์โมคัปเปิ้ลในปัจจุบัน



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิ้ลในปัจจุบัน

2.3.2 หลักการทำห้วัดอุณหภูมิ

ในการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลนั้นจะต้องควบคุมอุณหภูมิที่รอยต่อด้านหนึ่งไว้ในอุณหภูมิคงที่ รอยต่ออีกด้านหนึ่งอยู่ในอุณหภูมิที่ต้องการวัด ถ้าต้องการความเที่ยงตรงสูงจะต้องแช่รอยต่อด้านหนึ่งไว้ในกระติกน้ำแข็งที่ 0°C แต่ถ้าไม่ต้องการความเที่ยงตรงมากนัก ก็ปล่อยให้รอยต่อด้านอื่นไว้ที่อุณหภูมิปกติได้ จากนั้นทำการวัดแรงดันที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ล แล้วนำมาอ่านอุณหภูมิที่แท้จริงจากสมการ

$$V_x = V_m + V_n$$

เมื่อ V_{oc} คือ แรงดันที่เบคท์เกิดขึ้นที่รอยต่อแอคทีฟ (ในอุณหภูมิที่ต้องการทราบ)

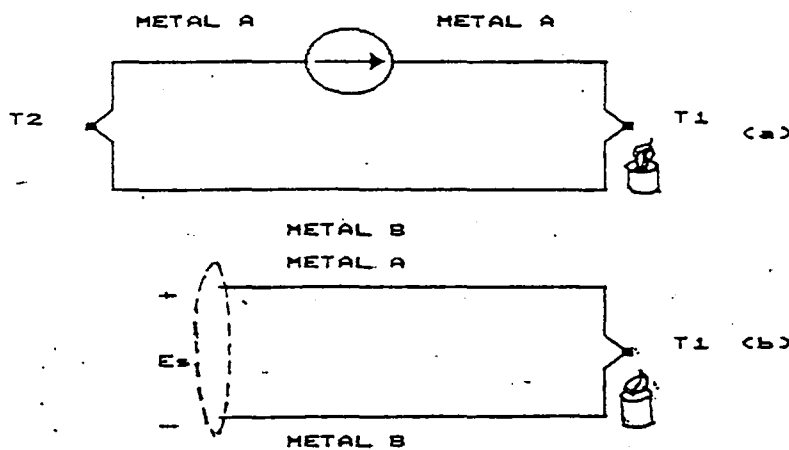
V_{sc} คือ แรงดันที่วัดได้

V_{oc} คือ แรงดันที่เบคท์เกิดขึ้นที่รอยต่อแอคทีฟ (ในอุณหภูมิที่คงที่)

หรือจะกล่าวง่าย ๆ ก็คือ หาค่าแรงดัน V_{oc} จากตารางความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและอุณหภูมิเมื่อทราบค่าอุณหภูมิอ้างอิง (T_1) แล้วนำไปบวกกับ (T_2) จากตารางเดิมอีกครั้งหนึ่ง

ในชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคั้นั้น ถ้าใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง จะมีสัญญาณรบกวนมากขึ้น หัววัดอุณหภูมิที่ใช้จึงต้องให้ค่าเอาพุทที่สูง โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้เทอร์โมคัปเปิล ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงมาก (มากกว่า 500 องศา)

ลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลก็คือ เมื่อนำโลหะ 2 ชนิดมาเชื่อมที่ปลายทั้งสองข้าง และปลายข้างหนึ่งให้ความร้อนสูงกว่าอีกข้างหนึ่ง จะเกิดกระแสไหลขึ้นในวงจรมีรูปที่ 2.10a



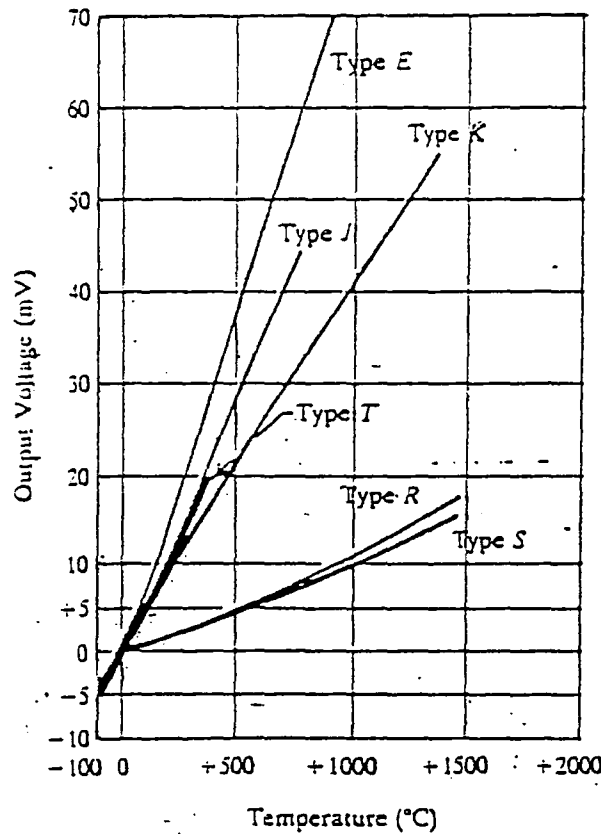
รูปที่ 2.10 หลักการพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล

ถ้าเราตัดวงจรออกครึ่งหนึ่ง แล้วเปิดวงจรนั้นไว้ดังรูปที่ 2.10b จะมีแรงดันเกิดขึ้นค่าหนึ่ง ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความแตกต่างอุณหภูมิของรอยต่อกับที่ปลายขั้ว ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย โทมัส ซีเบค (Thomas Seebeck) ในปี 1891 เรียก ปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck Effect) และแรงดันที่เกิดเรียกว่าแรงดันซีเบค (Seebeck Voltage) ซึ่งขนาดของแรงดันนี้ขึ้นกับชนิดของโลหะทั้งสองที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลและหาได้จาก

$$E_s = \alpha_{AB} (T_1 - T_2)$$

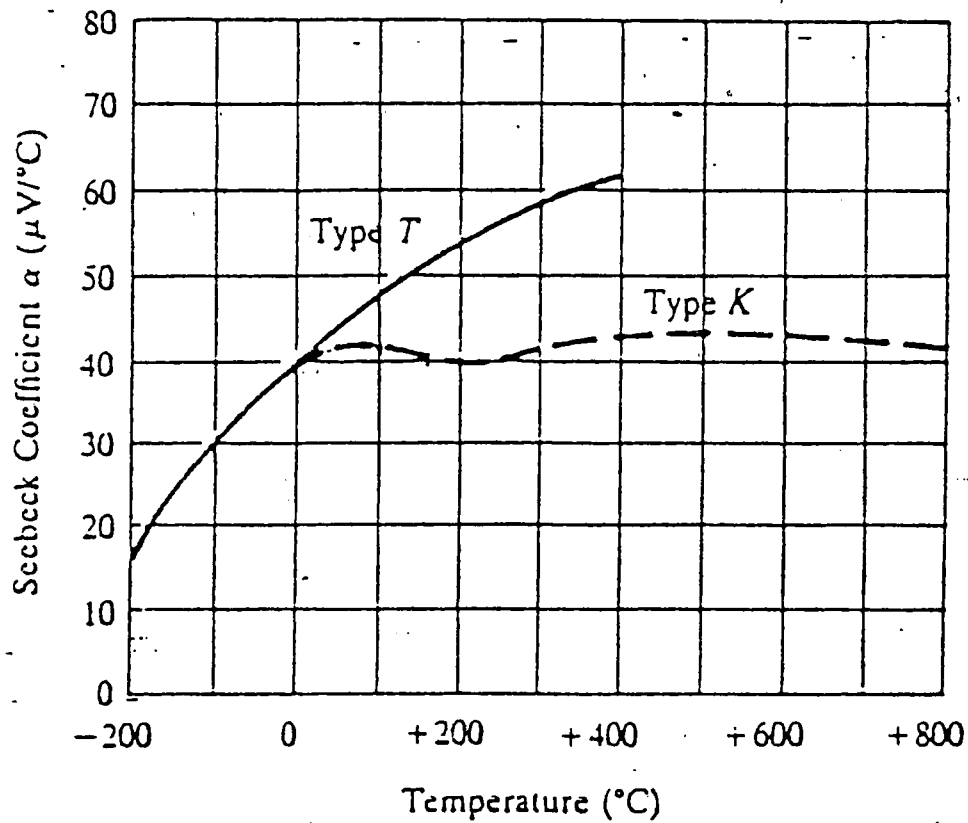
α_{AB} คือสัมประสิทธิ์การแปรผัน เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของซีเบค (Seebeck Coefficient)

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในท้องตลาดมีด้วยกันหลายชนิด เช่น ชนิด T, ชนิด K, ชนิด E, ชนิด R, ชนิด S, ชนิด B เป็นต้น รูปที่ 2.11 แสดงกราฟระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ

สำหรับเครื่องวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค มักนิยมใช้ชนิด K ซึ่งสามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -200 ถึง 1,260 องศา โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของซีเบคที่อุณหภูมิ 25 องศาเท่ากับ $40.5 \mu\text{V}$ ต่อ องศา และมีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 0-800 องศา ดังแสดงในกราฟรูปที่ 2.12 เปรียบเทียบกับชนิด T

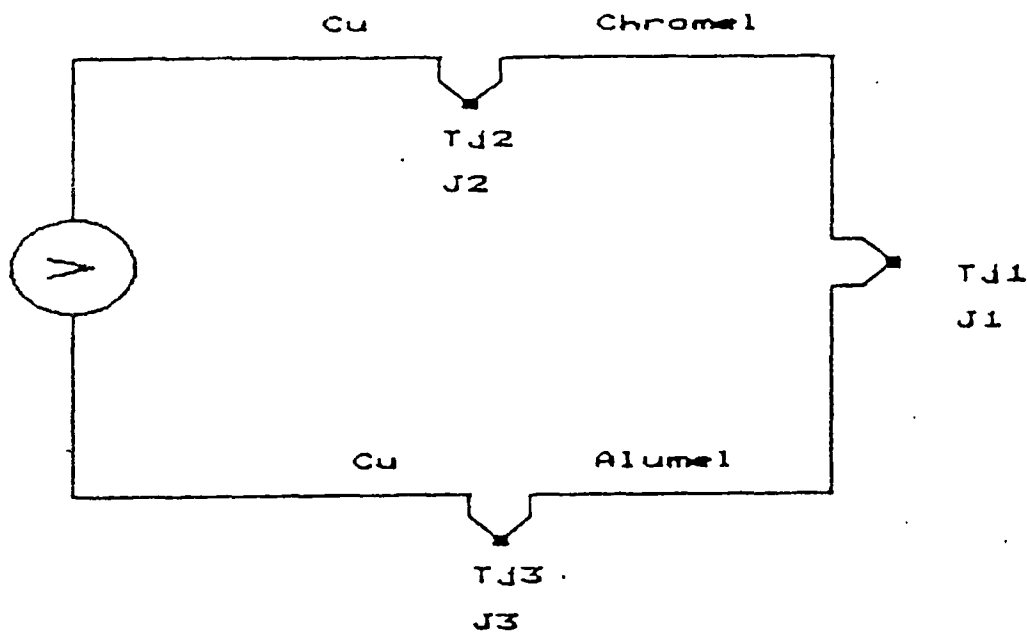


รูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิ

ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ทั่วไป ประกอบด้วย นิกเกิล(Nickel) 90 % โครเมียม(Chromium) 10 % มักเรียกขานนี้ว่า โครเมล(Chromel) ที่วลประกอบด้วย แมงกานีส(Manganese) 2 % ซิลิกอน(Silicon) 1 % นิกเกิล(Nickel) 95 % และอลูมิเนียม(Aluminum) 2 % เรียกขานนี้ว่าอลูเมล(Alumel)

เราจะใช้เทอร์โมคัปเปิลเพื่อแสดงอุณหภูมิปัจจุบัน และสัญญาณนี้ก็จะเป็สัญญาณป้อนกลับส่งให้ส่วนควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิด้วย

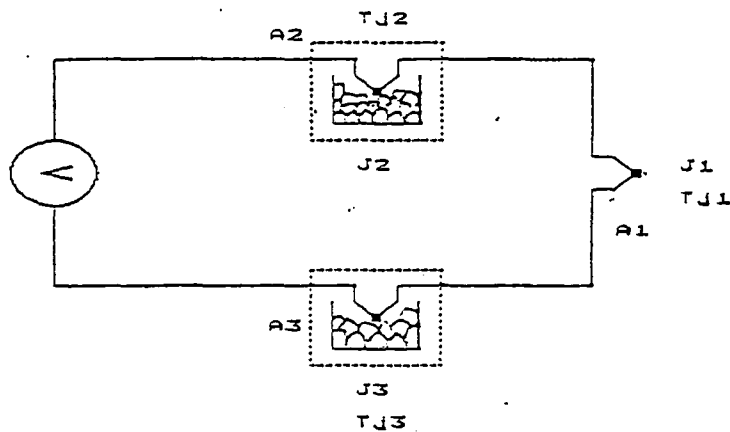
การวัดสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลโดยตรงนั้นไม่สามารถทำได้เพราะเมื่อเราต่อเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับโวลต์มิเตอร์ สายวัดของโวลต์มิเตอร์กับเทอร์โมคัปเปิลก็จะเกิดเป็นเทอร์โมคัปเปิลอีกอันหนึ่งดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงเทอร์โมคัปเปิลที่เกิดขึ้นระหว่างสายวัดกับเทอร์โมคัปเปิล

ถ้าให้สายวัดของโวลต์มิเตอร์เป็นทองแดง จะเห็นว่าเกิดเทอร์โมคัปเปิลขึ้นใหม่ 2 อัน โดยที่ไม่ได้ตั้งใจคือตรงรอยระหว่างทองแดงกับโครเมิลและทองแดงกับอลูเมิล ดังนั้นอุณหภูมิที่วัดได้จริงคือผลต่างของอุณหภูมิที่รอยต่อทั้งสาม

วิธีการที่จะวัดอุณหภูมิเพื่อให้ได้อุณหภูมิเฉพาะที่รอยต่อ J1 อย่างเดียวสามารถทำได้โดยการทำให้อุณหภูมิของรอยต่อที่เหลือมีค่าคงที่ ที่ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งปกติมักจะให้เป็น 0 องศา โดยแช่ลงในอ่างน้ำแข็งดังรูปที่ 2.14



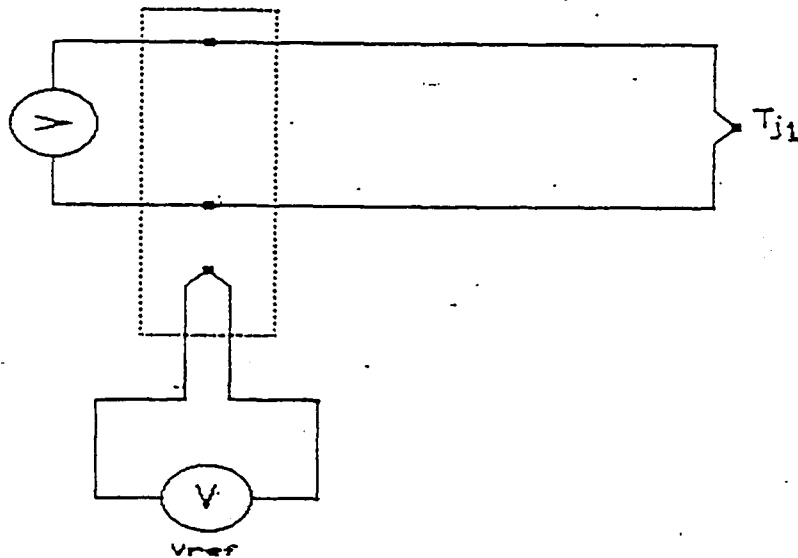
รูปที่ 2.14 การรักษาอุณหภูมิที่รอยต่ออ้างอิงให้คงที่โดยแช่ในน้ำแข็ง

ในรูปปลายของแท่งโครเมิลและอลูเมิลมีอุณหภูมิเท่ากันคือ T_{12} เท่ากับ T_{13} เท่ากับศูนย์ ดังนั้นอุณหภูมิที่วัดได้คืออุณหภูมิของรอยต่อ J_1 เทียบกับศูนย์ เราเรียกรอยต่อที่ถูกทำให้คงที่เป็นศูนย์องศาว่า รอยต่ออ้างอิง (reference junction)

ในการใช้งานจริงๆ นั้น การทำรอยต่ออ้างอิงโดยการนำไปแช่น้ำแข็งมีความยุ่งยากมากเราจึงใช้วิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์ช่วยซึ่งใช้หลักการวัดอุณหภูมิของรอยต่ออ้างอิง แล้วนำอุณหภูมินี้ไปบวกกับอุณหภูมิที่อ่านได้จากโวลต์มิเตอร์อีกที่ดังรูปที่ 2.15

ซึ่งเรียกวางจรที่ทำหน้าที่นี้ว่า วงจรชดเชยศูนย์องศา (cold junction compensation)

$$V_{T_{A1}} = V + V_{\text{cor}} \dots \dots \dots (1)$$



รูปที่ 2.15 การชดเชยศูนย์องค์ค่า

วิธีการวัดอุณหภูมิตรงรอยต่ออ้างอิงนั้น อาจใช้อุปกรณ์อะไรก็ได้ที่มีค่าเปลี่ยนแปลง กับอุณหภูมิ เช่น เทอร์มิสเตอร์ (thermistor), IC ตรวจจับอุณหภูมิ หรือแม้กระทั่งแรงดันตรงรอยต่อ P-N ของไดโอด เป็นต้น แต่ต้องมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของอุปกรณ์ตัวนั้นให้มีค่าเท่ากับสัมประสิทธิ์ที่เบคของเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ด้วย

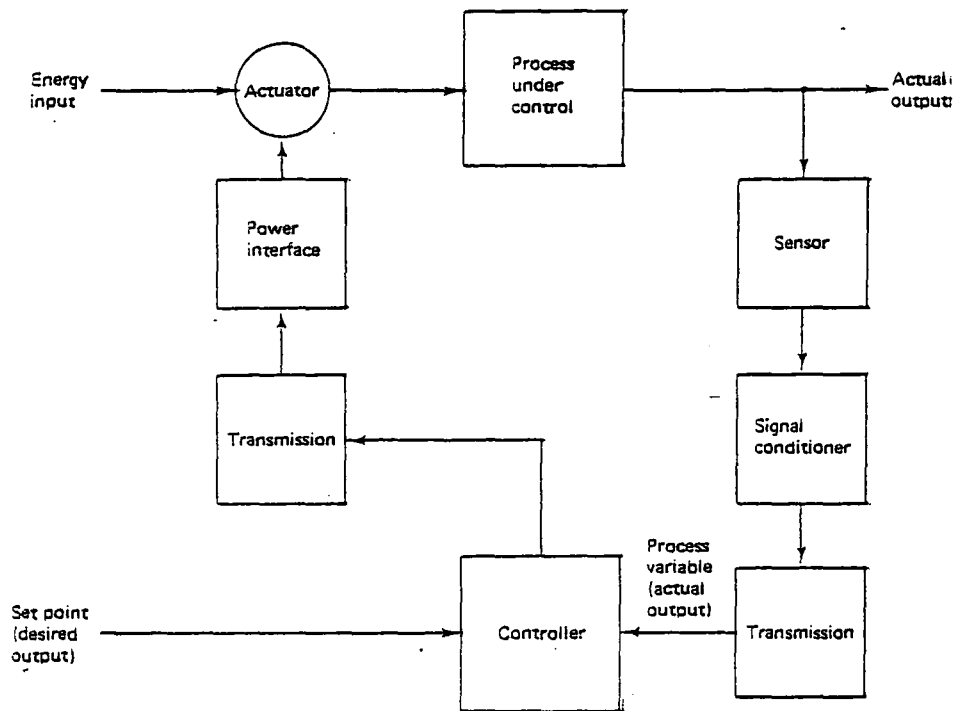
หลักการควบคุมอุณหภูมิ

2.4 หลักการควบคุมอุณหภูมิ

ในการควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่ จะต้องทำการศึกษาหลักการควบคุมแบบอนาลอก และการทำงานของวงจรรอบแอมป์แบบต่าง ๆ เพื่อนำวิธีการที่เหมาะสมมาใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ

2.4.1 หลักการควบคุมแบบอนาลอก

ในการควบคุมของระบบ สิ่งที่เราต้องการควบคุมคือ เซ็ต ค่าของระบบที่เราทดลองให้อยู่ในระดับที่เราต้องการ ในหัวข้อนี้จะอธิบายการควบคุมแบบต่างๆ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป ก่อนอื่นเรามารู้จักตัวแปรที่เราใช้ในการควบคุมก่อน



รูปที่ 2.16 แสดงแผนภาพของระบบควบคุมพารามิเตอร์

จากรูปที่ 2.16 เราจะเห็นว่าเป็นแบบแผนภาพของระบบควบคุมพารามิเตอร์ (Parameter control system) ซึ่งตัวควบคุมจะมีอินพุตที่ต้องการอยู่ 2 อินพุต อินพุตแรกจะเป็นค่าที่ต้องการของพารามิเตอร์ (Parameter) ซึ่งเราจะเรียกว่า set point (sp) อินพุตที่สองจะเป็นค่าจริงของพารามิเตอร์นั้น ซึ่งอาจจะถูกวัดโดยตัวตรวจจับ (sensor), เงื่อนไขและการส่งไปให้ตัวควบคุม ซึ่งเราจะเรียกว่า ตัวแปรขบวนการ (process variable (PV) มันคือจุดประสงค์ของตัวควบคุมที่จะวัดให้สัญญาณ ให้ค่า PV เท่ากับ SP การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ของ SP หรือ โหลดที่เกี่ยวข้องกับขบวนการ ควบคุมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนของตัวควบคุมเอาท์พุท ซึ่งค่า PV จะต้องสัมพันธ์กับ SP

ในหัวข้อต่อไปจะอธิบายเกี่ยวกับการควบคุมแบบต่าง ๆ แต่ก่อนอื่นเราต้องรู้จักทฤษฎีการควบคุมก่อน

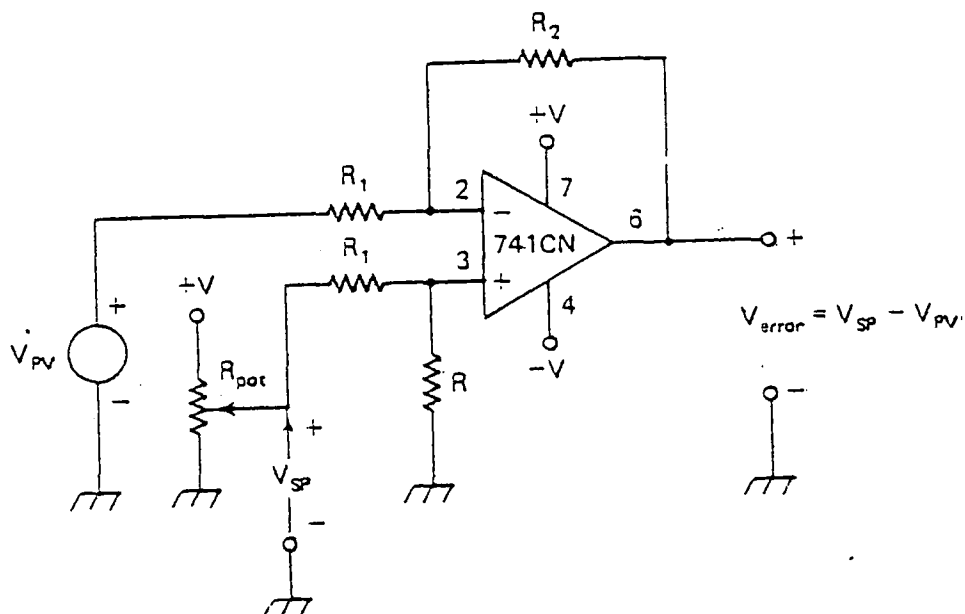
2.4.2 ตัวขยายสัญญาณที่ผิดพลาด (error Amplifier)

ตัวควบคุมทั้งหมดโดยทั่วไปจะมีสัญญาณที่ผิดพลาดออกมาดังนี้

$$E = SP - PV$$

ขนาด คือ ความต่างศักย์ระหว่าง SP กับ PV ถ้าค่า PV เล็กกว่า SP จะให้ค่าผิดพลาดแบบบวก

(+) ค่าผิดพลาดแบบลบเกิดขึ้นเมื่อค่า PV มากกว่าค่า SP



รูปที่ 2.17 ก ค่าความแตกต่างของการขยายสัญญาณ

จะได้ออกมาดังนี้

$$V_{out} = (R_2/R_1) \cdot (V_2 - V_1)$$

โดยให้ค่า

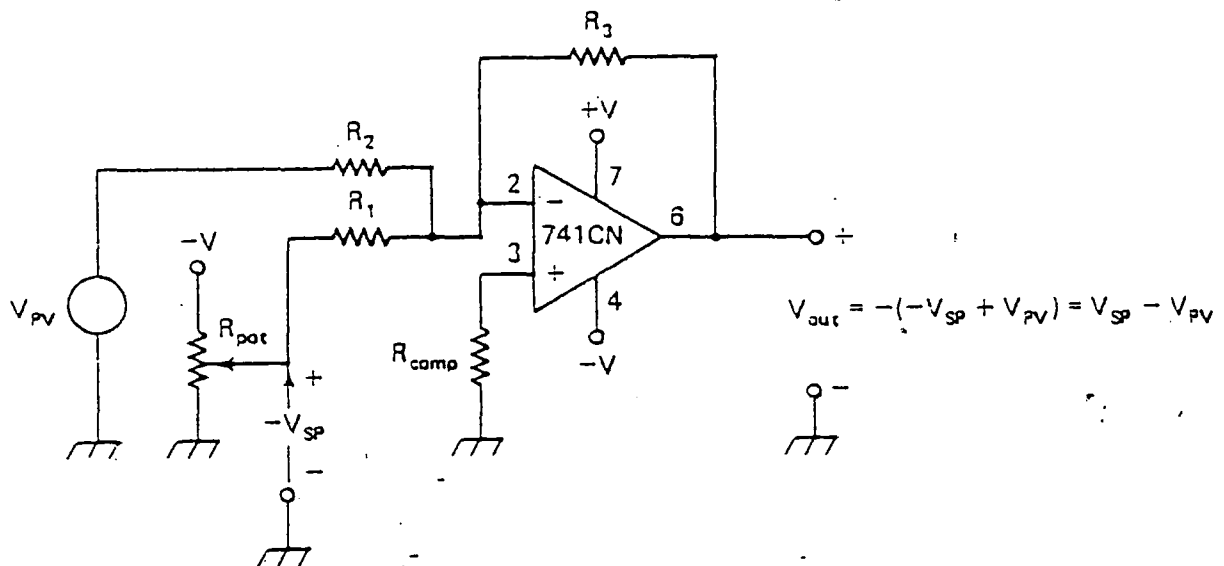
$$R = R_2 = R_1$$

$$V_2 = V_{sp}$$

$$V_1 = V_{pv}$$

$$V_{out} = V_{error} = V_{sp} - V_{pv}$$

เราต้องมั่นใจว่า $R \gg R_{out}$ เพื่อ minimize loading ของ R ปรับค่าได้ เพื่อลดปัญหา กระแสไบอัส และค่าความต้านทานทั้ง 4 ตัวจะต้องแมทช์กัน เพื่อป้องกันปัญหาไบอัสและออฟเซ็ท ซึ่งเป็นการดัดที่เพิ่ม common-mode rejection (การขจัดสัญญาณ common-mode) ($V_{sp} = V_{pv}$, $V_{error} = 0$)



รูปที่ 2.17 ข เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบ inverting summer

$$V_{out} = -[(R_3/R_2)V_1 + (R_3/R_2)V_2]$$

โดยให้

$$R = R_1 = R_2 = R_3$$

$$V_{out} = -[V_1 + V_2]$$

จากรูป 2.17 ข จะได้ว่า

$$V_1 = -V_{out}$$

$$V_2 = V_{out}$$

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{error} \\ &= V_{in} - V_{out} \end{aligned}$$

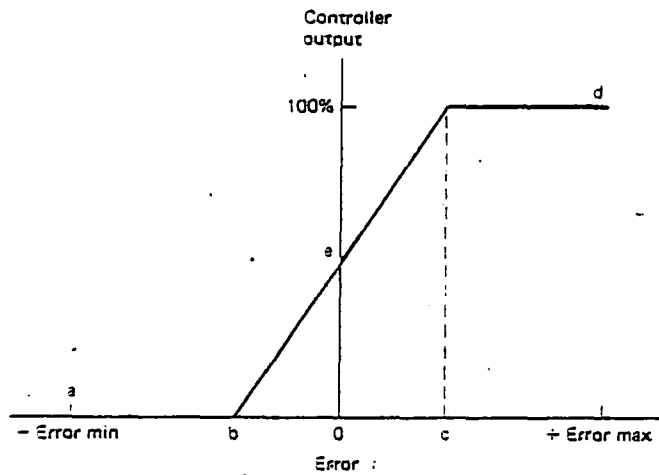
เพื่อให้แน่ใจว่าเป็นการทำงานที่เหมาะสม คุณจะต้องใช้ค่าลบของ SP ที่ต้องการซึ่งเป็นการถูกกลับโดยวงจร inverting summer ซึ่งเหมือนกับวงจร different amplifier

$$R \gg R_{out}$$

ตัวต้านทาน R_{comp} คือ ตัวชดเชย (compensate) สำหรับผลของกระแสไบอัส และมีค่าเท่ากับการขนานกันทั้งหมดของตัวต้านทานที่ปลายขา inverting the virtual ground ที่ขา inverting ของวงจรsummer จะแยกกันแต่ละอินพุตแต่ละตัวโดยปราศจากผลกระทบกับอินพุตอื่น แต่จะไม่ใช่จริงสำหรับวงจร difference amplifier

ต่อไปจะขออธิบายเกี่ยวกับการควบคุมแบบได้สัดส่วน ดังนี้

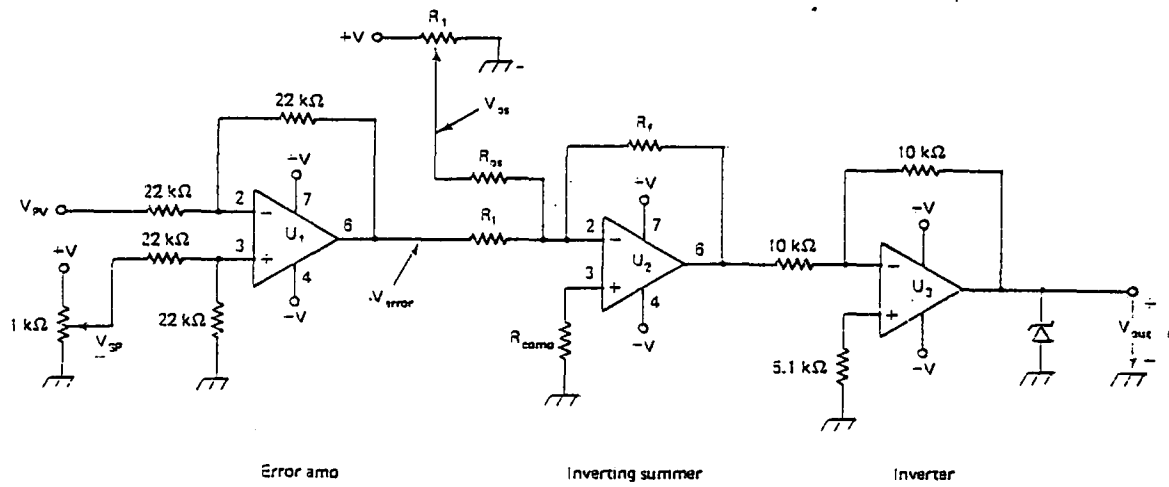
1. ตัวควบคุมแบบได้สัดส่วนกัน (PROPORTIONAL CONTROLLER)



รูปที่ 2.18 คือ transfer curve ของตัวควบคุมแบบได้สัดส่วน

จากรูป large negative error (การผิดพลาดแบบลบอย่างมาก) จะทำให้การควบคุมแบบได้สัดส่วน เพิ่มขึ้นแบบ full off (จุด a) large position error (ความผิดพลาดแบบบวกอย่างมาก) จะส่งผลให้เอาต์พุตเป็น 100 % (จุด d) ซึ่งจะเหมือนกับว่ามันทำกับตัวควบคุม 2 ตำแหน่ง (two-position controller) อย่างไรก็ตามตำแหน่งของ deadband (ช่วงที่ตำแหน่งแน่นอน) ตัวควบคุมแบบได้สัดส่วนจะมีพื้นที่ตอบสนองที่ linear (จุด b ถึง c) การเปลี่ยนแปลงเล็ก ๆ ของค่าผิดพลาดจะทำให้การเปลี่ยนแปลงแบบได้สัดส่วนกันเกิดขึ้น ที่เอาต์พุตของตัวควบคุมซึ่งเป็นการควบคุมที่สะดวกกว่าขบวนการ (process)

ตัวควบคุมแบบได้สัดส่วน จะถูกอธิบายช่วงที่ได้สัดส่วนของตัวเอง ซึ่งช่วงที่ได้สัดส่วน ก็คือการเปลี่ยนแปลงในกรณีที่เกิดการผิดพลาด ซึ่งจะเป็นเหตุให้เอาต์พุตเพิ่มขึ้น จาก full off ไปถึง full on



รูปที่ 2.19 แสดงแผนภาพของวงจรตัวควบคุมแบบได้สัดส่วนกัน

โดย OP AMP U1 จะผลิตสัญญาณผิดพลาด (error signal) จากเซ็ตค่า (V_{sp}) และสัญญาณตัวแบ่งขบวนการ (process variable (V_{sp})) ออปแอมป์ U2 จะวัดช่วงที่ได้สัดส่วน (the proportional band) U3 เป็นตัวกลับสัญญาณอย่างง่าย ๆ เพื่อชดเชยสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของ U2 ซีเนอร์ไดโอดจะจำกัดค่าโวลต์เดจจ์เอาท์พุทแบบบวกและลบ ซึ่งจะอธิบายสมการของวงจรดังนี้

$$V_{out} = (R_f/R_1)V_{error} + (R_f/R_{ob})V_{ob}$$

โดยทั่วไป $R_f = R_{ob}$

ดังนั้น

$$V_{out} = (R_f/R_1)V_{error} + V_{ob} \quad (1)$$

โดยไม่มีค่าผิดพลาด

$$V_{\text{error}} = 0$$

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ob}}$$

เราสามารถเซ็ต ค่าเอาต์พุตควบคุมที่ต้องการได้ สำหรับไม่มีข้อผิดพลาดทางอินพุตความชันของtransfer curve จะถูกพิจารณาโดยอัตราขยายที่ถูกให้กับ V_{error} โดยวงจรinverting amplifier

$$m = R_f / R_i \quad (2)$$

ถ้าแกน X คือ โวลต์ สมการที่ 2 จะกลายเป็น

$$m = R_f / R_i = V_{\text{out}} / (\alpha \text{ band} \times V_{\text{error}}) \quad (3)$$

การทำงานของวงจรนี้ ถ้าเกิดมีค่าผิดพลาดที่เกิดเอาต์พุตของวงจร เราสามารถลดค่าผิดพลาด โดยการเพิ่มอัตราขยาย (gain) ของ U2 แต่ระวังการเกิดออสซิลเลชัน

โดยปกติวิศวกรฝ่ายควบคุมจะเขียนสมการของระบบในรูปแบบลาปลาซ เพราะฉะนั้นสมการ(1) จึงเขียนใหม่ได้ว่า

$$V_{\text{out}} = K_p \cdot V_{\text{error}}$$

เมื่อ

$$V_{\text{out}} = \text{เอาต์พุตของตัวควบคุม}$$

$$K_p = \text{อัตราขยายของตัวควบคุม}$$

$$V_{\text{error}} = \text{ค่าผิดพลาด}$$

the transfer function ของ ตัวควบคุมแบบได้สัดส่วนกัน คือ

$$\text{transfer function} = V_{\text{out}} / V_{\text{error}} = K_p$$

2.5 วงจรขยายสัญญาณ

ในเครื่องมีอวัตทุกชนิด ส่วนที่ทำให้การวัดมีความละเอียดถูกต้องแม่นยำนั้น ขึ้นอยู่กับหัววัด และส่วนขยายสัญญาณจากหัววัด ซึ่งถ้าเกิดความผิดพลาดขึ้นในส่วนใดส่วนหนึ่งจะทำให้ผลการวัดผิดพลาดไปด้วย ดังนั้นการเลือกชนิดของหัววัด และวิธีการขยายสัญญาณจากหัววัดมาแสดงผล จึงมีความสำคัญมาก

จากที่ทราบแล้วว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค สามารถหาได้จากสมการ

$$\alpha = \Delta V / \Delta T$$

โดย ΔV คือ สัญญาณซีเบคโวลต์เตต

ΔT คือ อุณหภูมิที่แตกต่างกันบริเวณหัวบน และล่างของสารตัวอย่าง

ค่า ΔT สามารถหาได้โดยการใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K วัดเป็นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางค่าอุณหภูมิ เราจะได้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ แต่ค่าสัญญาณซีเบคโวลต์เตตจากสารตัวอย่าง และเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K นั้นมีค่าน้อยมาก จึงจำเป็นต้องใช้วงจรขยายสัญญาณ เพื่อการสังเกตผลการทดลองที่สะดวกขึ้น โดยเลือกใช้วงจรขยายความต่างสามสเตทในการขยายสัญญาณ ΔT เนื่องจากป้องกันสัญญาณรบกวนจากอุณหภูมิได้ดี และเลือกใช้วงจรขยายความต่าง โดยใช้ออปแอมป์ตัวเดียวในการขยายสัญญาณ ΔV เนื่องจากมีขนาดเล็กและมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะใช้ขยายสัญญาณจากสารตัวอย่างได้ ซึ่งจะอธิบาย หลักการออกแบบวงจรขยายต่อไป

2.5.1 เครื่องขยายสัญญาณความแตกต่างอุณหภูมิของหัวบน และล่างของสารตัวอย่าง

สำหรับชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค หัวใจของเครื่องก็คือการวัดความแตกต่างอุณหภูมิของหัววัดของหัวทั้งสองของสารตัวอย่าง อุณหภูมิที่สูงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อนยิ่ง มีค่ามาก ดังนั้นชนิดของหัววัดที่ใช้จึงต้องทนความร้อนได้สูงและสัญญาณเอาพุตต้องมีค่าสูงด้วย เพื่อให้ส่วนขยายสัญญาณสามารถแยกสัญญาณที่ต้องการจากสัญญาณรบกวนได้

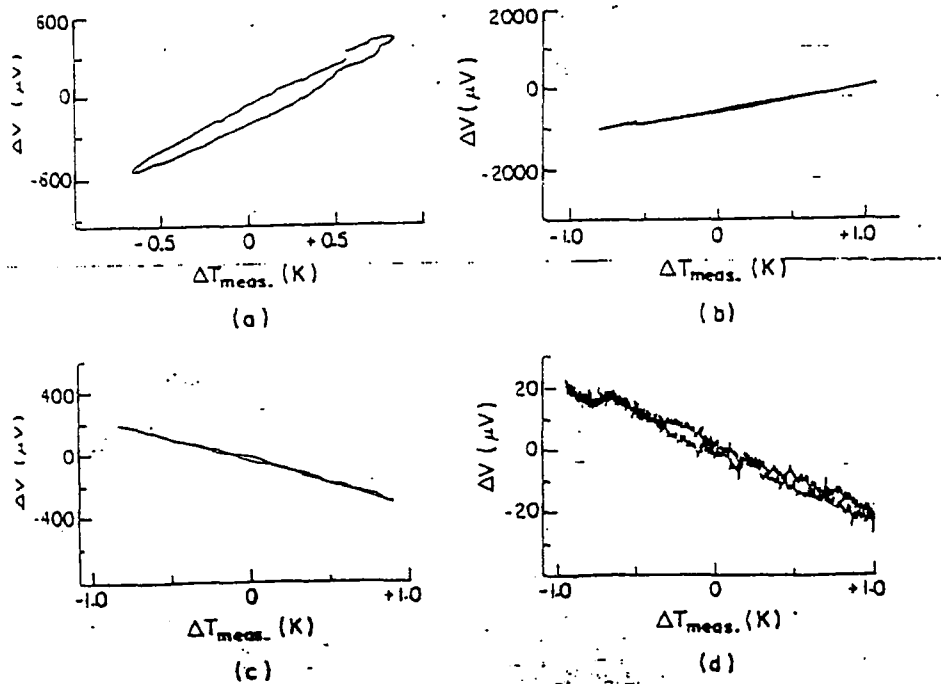
เนื่องจากสัญญาณความแตกต่างความร้อนมีค่าน้อยมาก ดังนั้นส่วนขยายสัญญาณจะต้องมีความ

ไวพจน์ที่จะตรวจจับสัญญาณนั้น อีกทั้งตัวมันเองจะต้องไม่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณรบกวนด้วย

สัญญาณที่ใช้ในชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค นั้นคือ สัญญาณความแตกต่างอุณหภูมิของหัวบน และล่างของสารกึ่งตัวนำ จะอยู่ในแกน X ของ X-Y recorder

2.5.2 เครื่องขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซีเบคโวลต์เตก

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าซีเบค ซึ่งค่าที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ถ้าสารนั้น ให้ค่าแรงดันซีเบคที่มีค่ามากอยู่แล้วก็ไม่ต้องขยายสัญญาณ โดยจะนำสัญญาณที่ได้ให้อยู่ในแกน y ของ X-Y recorder ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การวัดสัญญาณของชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

หลักในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่ใช้

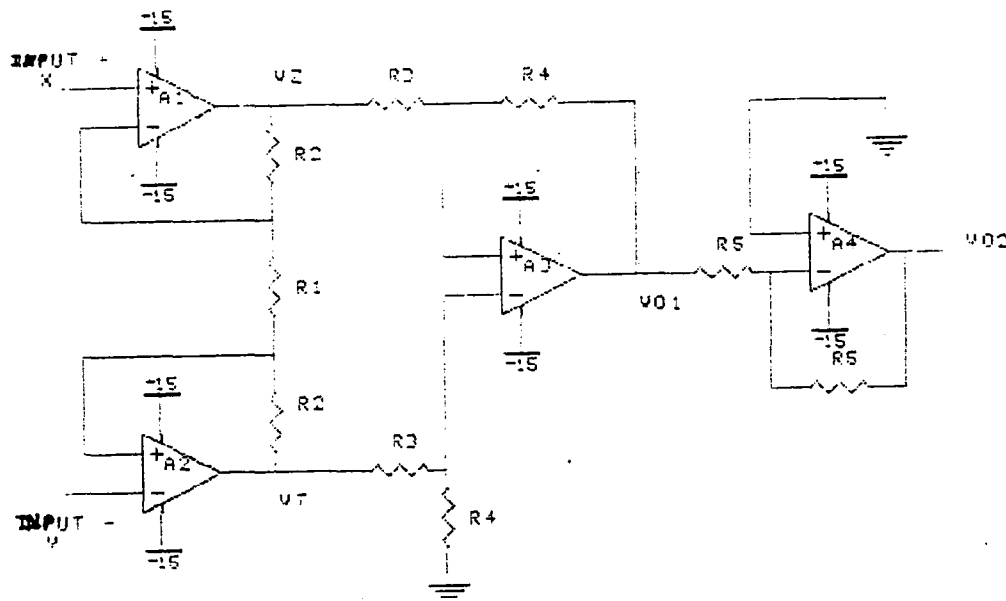
1. ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของวงจรต้องมีค่ามากกว่า อิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ 1000 เท่าขึ้นไป

2. อัตราขยายสัญญาณ (Gain) จะต้องมีค่าเหมาะสมกับสัญญาณอินพุท เพื่อไม่ให้สัญญาณเอาต์พุทเกิดสถานะอิ่มตัว (Saturate) และสัญญาณรบกวน ซึ่งมีตามธรรมชาติถูกขยาย และทำให้วงจรขยายสัญญาณทำงานผิดพลาด

- วงจรออปแอมป์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณ ΔT

ในการขยายสัญญาณความแตกต่างอุณหภูมิขั้วบน และล่างของสารตัวอย่างเราเลือกใช้วงจรขยายความต่าง สามสเตจ ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

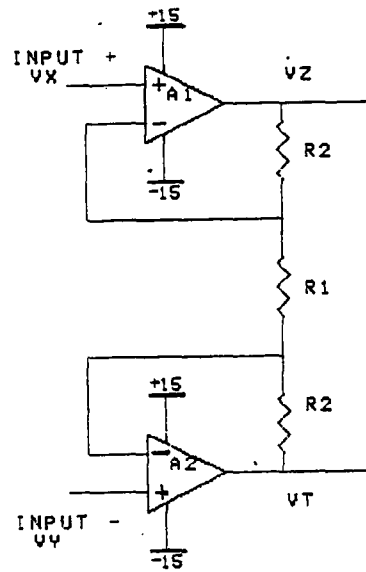
วงจรขยายสัญญาณประกอบด้วย สามสเตจ ดังรูป 2.21



เราทำการแยกพิจารณาตามแต่ละสถานะ ดังนี้

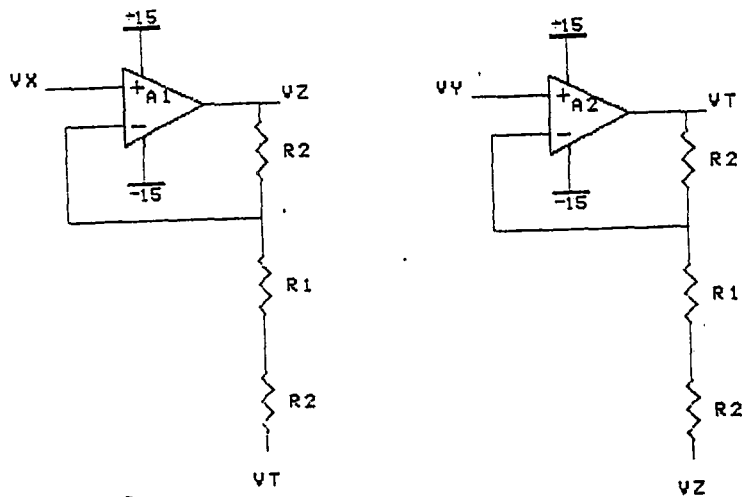
สถานะแรกเป็นวงจรขยายความต่างแบบสองออปแอมป์ ซึ่งมีส่วนสำคัญ คือค่าอัตราขยายความต่างศักย์ และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ซึ่งขึ้นกับออปแอมป์ที่ใช้ในวงจร ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป ดังนี้

พิจารณาวงจร ดังรูป 2.22



รูปที่ 2.22 differential with two op-amp

เราใช้ทฤษฎีการซ้อนทับ (Superposition Theory) ในการพิจารณาอัตราขยายสัญญาณ โดยพิจารณาที่ออปแอมป์แต่ละตัว ดังรูป 2.23



รูปที่ 2.23 วงจรขยายสัญญาณ แยกพิจารณาทีละตัว

จากรูป 2.23 จะได้ว่า

$$V_z = (2R_2 + R_1 / R_2 + R_1)(V_x) - (R_2 / R_2 + R_1)(V_o) \quad (1)$$

และ $V_o = (2R_2 + R_1 / R_2 + R_1)(V_y) - (R_2 / R_2 + R_1)(V_z) \quad (2)$

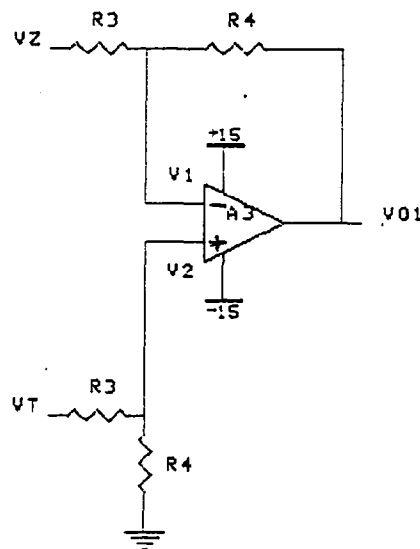
ดังนั้น $V_{zo} = V_z - V_o$

$$= (2R_2 + R_1 / R_2 + R_1)(V_x - V_y) - (R_2 / R_2 + R_1)(V_z - V_o) \quad (3)$$

จัดรูปใหม่จะได้ว่า ค่าอัตราขยายของสถานะแรก

$$A_{v1} = V_{zo} / V_{xy} = 2R_2 + R_1 / R_1 \quad (4)$$

ต่อมาพิจารณา สถานะที่สองของวงจร คือ ออปแอมป์ A_2



รูปที่ 2.24 differential amplifier with one op-amp

จากวงจร ดังรูป 2.34 มีสองอินพุต V_z และ V_o เราใช้ทฤษฎีการซ้ำซ้อน เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง อินพุต และเอาต์พุต ดังนี้

เรากำหนดให้ $V_o = 0$ V เพื่อหาค่าความต่างศักย์เอาต์พุตเนื่องจาก อินพุต V_z คือ

$$V_{oz} = -R_4 / R_3 V_z \quad (5)$$

เรากำหนดให้ $V_{in} = 0$ V จากวงจรดังรูป เราพิจารณาในลักษณะเป็นแบบวงจรขยายแบบ
นอนอินเวอร์ตติ้ง โดย R_3 และ R_4 จะมีลักษณะเป็นวงจรแบ่งแรงดัน โดยจะได้ว่า

$$V_1 = R_4 / (R_3 + R_4) V_o \quad (6)$$

สัญญาณเอาต์พุตเนื่องจากอินพุต V_o คือ

$$V_{ot} = (1 + R_4/R_3) V_1 \quad (7)$$

แทนค่า (6) ใน (7) ดังนั้น

$$V_{ot} = R_4/R_3 V_o \quad (8)$$

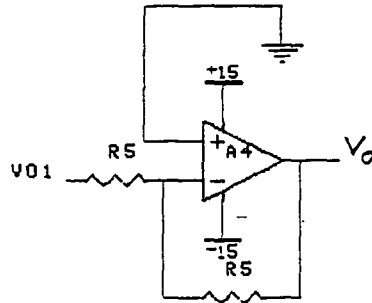
จากสมการ (5) และ (7) จะได้

$$V_o = V_{o_{in}} + V_{o_{out}} \quad (9)$$

$$V_o = -R_4/R_3 (V_{in}) \quad (10)$$

$$\text{เราจะได้ว่า } A_{v_{out}} = V_o/V_{in} = -R_4/R_3 \quad (11)$$

ส่วนที่ 3. เป็นวงจรขยายแบบกลับเฟส เพื่อให้อัตราขยายสัญญาณเป็นสัดส่วนตรง กับสัญญาณ
อินพุต ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 วงจรขยายกลับเฟส

$$V_o / V_x = - R_o / R_s \quad (12)$$

เรากำหนดให้ $R_o = R_s$ จะได้ค่า

$$A_{d3} = -1$$

ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของวงจรในรูปที่ 2.25 มีความสัมพันธ์กับสัญญาณอินพุต ดังนี้

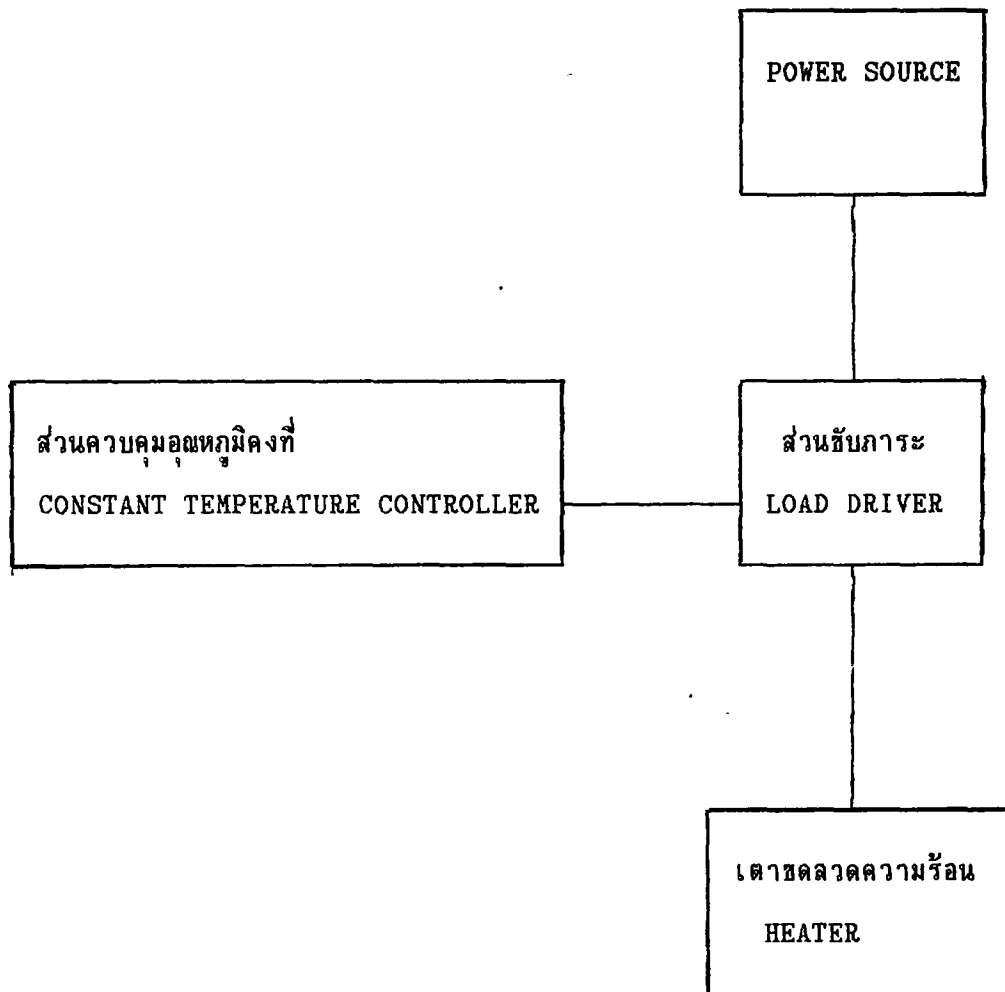
$$V_o = -1 \left(-R_4 / R_3 \right) \cdot \left(2R_2 + R_1 / R_1 \right) V_{xv} \quad (13)$$

- วงจรขยายสัญญาณ ΔV

เราใช้วงจรขยายความต่างโดยใช้ออปแอมป์ตัวเดียว ดังที่ได้อธิบายแล้วในหัวข้อวงจรขยายสัญญาณความต่างอุณหภูมิที่วบนและล่างของสารตัวอย่าง

2.6 หลักการสร้างแหล่งกำเนิดความร้อน (Load Driver & Power Source)

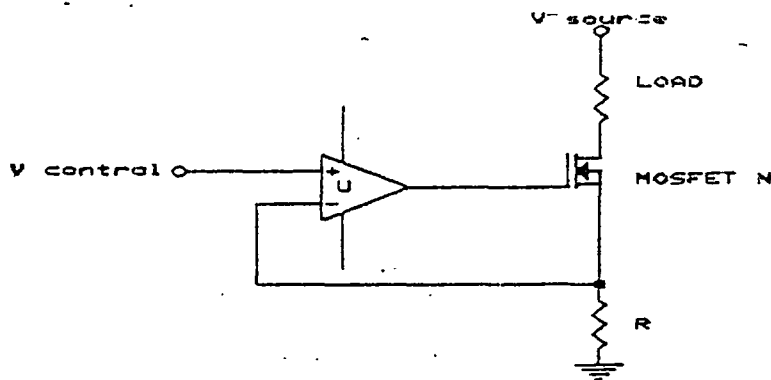
ในส่วนนี้ประกอบด้วยส่วนย่อย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะรับสัญญาณควบคุมจากส่วนควบคุมอุณหภูมิคงที่ มาแปลงเป็นสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาขดลวดความร้อน (load - driver) ส่วนที่สองคือส่วนแปลงไฟสลับให้เป็นไฟตรงเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเตา (power source) ซึ่งแสดงเป็นแผนผังดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ส่วนประกอบของส่วนให้พลังงานกับเตา

แต่ละส่วนมีการทำงานดังนี้

2.6.1 ส่วนรับสัญญาณควบคุมอุณหภูมิคงที่มาแปลงเป็นสัญญาณที่เหมาะสมเพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดความร้อนนั้น ใช้หลักการของการควบคุมกระแสคงที่ดังในวงจรรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 วงจรเครื่องควบคุมกระแสคงที่

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ขา inverting(-) กับขา noninverting(+) จะต้องมีแรงดันเท่ากัน

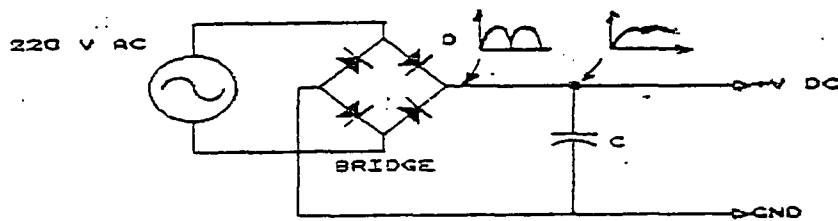
ดังนั้น แรงดันที่คร่อม R จะเท่ากับ Vcontrol เมื่อ R มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อเราเปลี่ยนแปลงค่า Vcontrol ก็จะเป็นการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ไหลผ่าน R โดยกระแสจะมีค่าเป็น

$$I = \frac{V_{control}}{R}$$

เนื่องจาก R1 , R และ FET ต่ออนุกรมกันอยู่ ดังนั้นกระแสที่ผ่าน R1 ซึ่งเป็นโหนดจะมีค่าเท่ากับ I ด้วย

2.6.2 ส่วนแหล่งจ่ายพลังงานให้กับขดลวดความร้อน(Power Source)

เนื่องจากในชุดตรวจวัดสัมประสิทธิ์ซีเบค จะต้องมีการนำหัววัดอุณหภูมิวางอยู่ตรงกลางเตาความร้อน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสัญญาณจากขดลวดความร้อนกับหัววัดอุณหภูมิ จึงเลือกไฟฟ้ากระแสตรงในการจ่ายพลังงานให้กับขดลวดความร้อน ซึ่งสร้างได้จาก การนำไฟฟ้ากระแสสลับมาผ่านวงจรเรียงกระแส(rectifier) และกรองกระแส(filter) ดังวงจรในรูปที่ 2.28



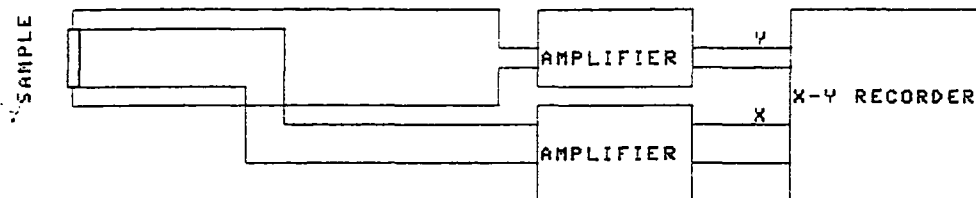
รูปที่ 2.28 วงจรแปลงไฟสลับเป็นไฟตรง

ไดโอดทั้ง 4 ตัวต่อแบบ bridge rectifier ตัวเก็บประจุ C ทำหน้าที่กรองสัญญาณสัญญาณที่ผ่านการกรองแล้วจะได้เป็นไฟตรงที่มีการกระเพื่อม (ripple) การกระเพื่อมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวเก็บประจุ

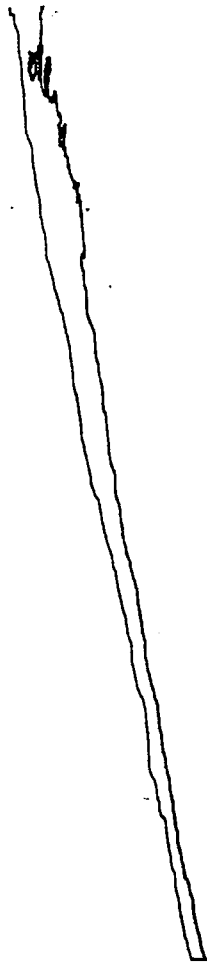
บทที่ 3

การสร้างชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

ในการดำเนินงานขั้นแรกได้เริ่มจากการศึกษาปฏิกิริยาของสารกึ่งตัวนำเมื่อทำให้อุณหภูมิของชิ้นส่วนบนและล่างของสารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิแตกต่างกัน โดยเริ่มที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการสร้างและหาข้อมูลต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสร้างจริง โดยนำสายเทอร์โมคัปเปิ้ล และสายทองแดงต่อสารกึ่งตัวนำดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการทดลองแนวความคิดเบื้องต้นของเครื่องวัดสัมประสิทธิ์ซีเบคอย่างง่าย



รูปที่ 3.2 ผลการทดสอบแนวความคิดเบื้องต้น

ในการทดลองไม่ได้สนใจค่าต่าง ๆ มากนัก สนใจแต่เพียงการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของสารกึ่งตัวนำที่สามารถตรวจวัดได้เท่านั้น ดังนั้นในการทดลองจึงใช้สารที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเป็นสารตัวอย่าง สารตัวอย่างที่ใช้คือ เทอร์โมคัปเปิ้ล type K นำเพียงส่วนหนึ่งตัดมาทดสอบ เริ่มการทดลองโดยใช้ไฟเผาที่ขั้วด้านหนึ่งของสาร แล้วทำการจับสัญญาณที่ได้ บันทึกโดย X-Y recorder โดยแกน X คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิของขั้วทั้งสอง และแกน Y คือ ค่าซีเบคโวลท์เตก จะเห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นอย่างชัดเจนซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ทำให้มั่นใจได้ว่าจะประสบความสำเร็จในการสร้างชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค ดังนั้นเราจึงเริ่มสร้างส่วนประกอบต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้การวัดมีความถูกต้องแม่นยำขึ้นจึงต้องสร้างส่วนประกอบที่จำเป็นต้องมีดังนี้

- แหล่งกำเนิดความร้อน หรือเตาไฟฟ้า และหัวจับสาร
- ส่วนควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่
- ส่วนขยายสัญญาณความแตกต่างอุณหภูมิของขั้วด้านบนและล่างของสารกึ่งตัวนำ
- ส่วนขยายสัญญาณซีเบคโวลท์เตก

รายละเอียดในการสร้างแต่ละส่วนจะได้กล่าวถึงต่อไป

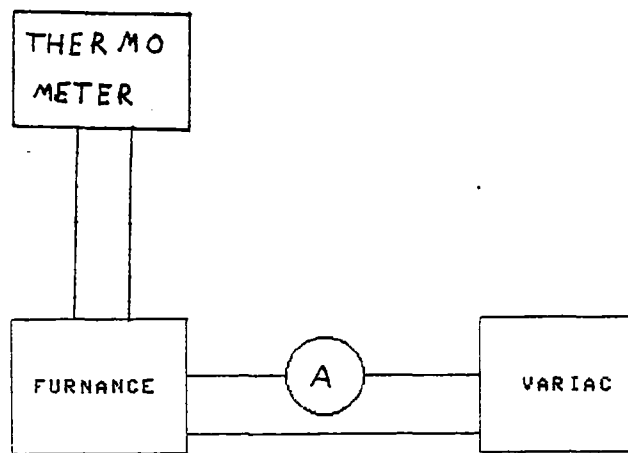
3.1 การสร้างแหล่งกำเนิดความร้อน หรือเตาไฟฟ้า และหัวจับสาร

ในการสร้างแหล่งกำเนิดความร้อน ควรศึกษาว่าจะใช้วัสดุชนิดใด ในการทำให้เกิดความร้อน ในการสร้างชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคนี้ใช้ชุดลดความร้อน ซึ่งความร้อนที่ต้องการจะสูงมาก หรือน้อย ขึ้นอยู่กับ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับชุดลด

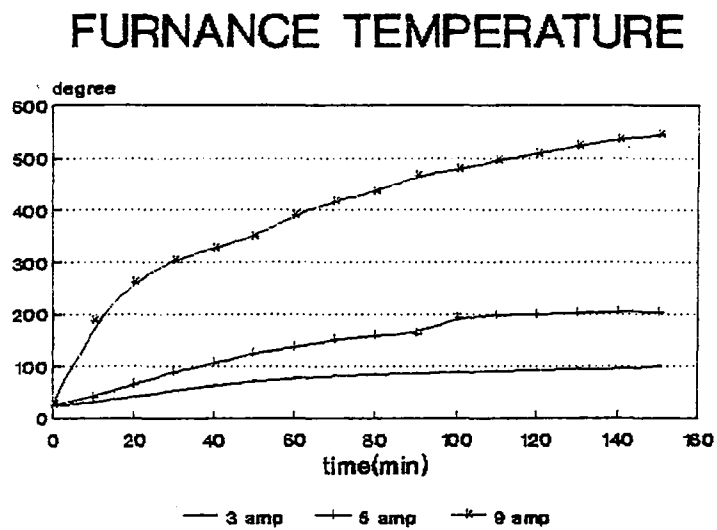
3.1.1 การสร้างส่วนให้พลังงานกับเตา(Load Driver & Power Source)

ในส่วนนี้แยกออกเป็นส่วนย่อย ๆ ดังนี้

3.1.1.1 ทดสอบว่าเตาที่ให้ความร้อนตามที่เรากำลังต้องการนั้น ใช้กระแสเท่าไร

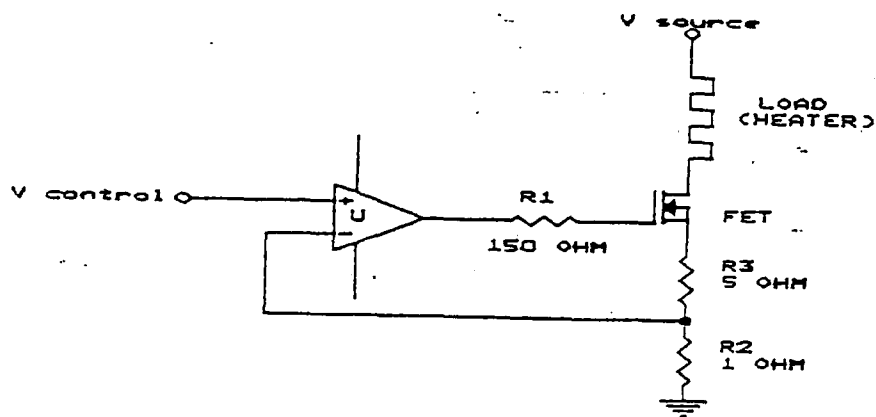


รูปที่ 3.3 แสดงวงจรทดสอบเตา



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กับเวลา

3.1.1.2 ส่วนรับสัญญาณจากส่วนควบคุมอุณหภูมิคงที่มาแปลงเป็นสัญญาณ เพื่อควบคุมกระแส ไฟฟ้าวงจรที่ใช้ตัดแปลงมาจากวงจรควบคุมกระแสคงที่ (current regulator) ซึ่งต้องสามารถ ปรับค่ากระแสที่ต้องการได้ตั้งแต่ศูนย์ถึงค่าที่ต้องการ วงจรพื้นฐานเป็นดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมกระแสคงที่

R1 มีไว้เพื่อลดการออสซิลเลทเนื่องจากการเดินสายจากเอาต์พุตของออปแอมป์ไปยังตัว FET
 R2 มีไว้เพื่อเป็นตัวตรวจสอบกระแสที่ไหล โดยออปแอมป์จะนำแรงดันที่คร่อม R2 นี้ไปควบคุม R2 ที่ใช้ควรมีค่าน้อยสุดเพื่อลดการสูญเสีย

ในการใช้งานมีความจำเป็นต้องใช้กระแสสุดประมาณ 10 แอมป์ และ V_s ที่ใช้มีค่า 180 V ดังนั้นจะต้องคำนึงถึงพลังงานที่สูญเสียในตัว FET ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned} V_{FET} &= V_s - V_{load} - V_{R2} - V_{R3} \\ &= V_s - IR_L - IR_2 - IR_3 \end{aligned}$$

พลังงานที่สูญเสียในตัว FET คือ $IV_{FET} = IV_{\underline{v}} - I^2(R_L + R_2 + R_3)$

เนื่องจาก $V_{\underline{v}}$ มีค่าเป็น 180 V , $R_L = 17$ โอห์ม , $R_2 = 1$ โอห์ม ,

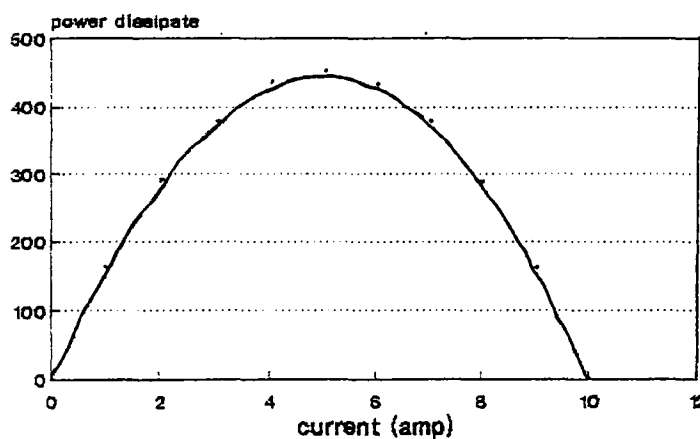
$R_3 = 0.1$ โอห์ม

ดังนั้นพลังงานที่สูญเสียในตัว FET ที่กระแสต่างๆ หาได้จาก

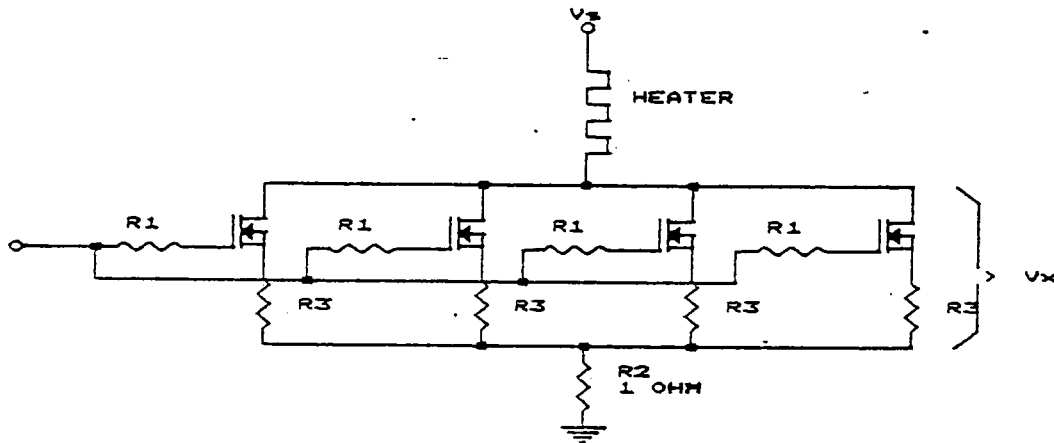
$$P_{\text{diss}} = 180 \times I - 18.1 \times I^2$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างกระแสค่าต่างๆกับพลังงานที่สูญเสียในตัว FET จะได้กราฟดังรูปที่ 3.6 มีค่าสูญเสียสูงสุดเท่ากับ 450 วัตต์ ซึ่งมีค่าสูงมากทำให้ FET เสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องลดพลังงานที่สูญเสียลงโดยต่อ FET ขนานเข้าไปเพื่อเฉลี่ยพลังงานที่สูญเสียนี้ดังรูปที่ 3.7

POWER DISSIPATE one mosfet



รูปที่ 3.6 กำลังสูญเสียใน FET เมื่อใช้ FET 1 ตัว



รูปที่ 3.7 การต่อ FET ขนานกัน

ตัวต้านทาน R3 มีประโยชน์มากเมื่อต่อ FET ขนานกัน เพราะจะช่วยลดผลเนื่องจากการ
 รั่ว FET ที่ไม่เท่ากัน เนื่องจากความไม่เหมือนกันโดยแท้จริงของ FET แต่ละตัวและลดกำลังไฟฟ้า
 ที่ตกคร่อม FET แต่ละตัวลง

เราสามารถหาพลังงานที่สูญเสียใน FET แต่ละตัวได้จาก

$$V_x = V_s - IR_L - IR_2$$

และ

$$V_x = \frac{IR_3}{a} + V_{FET}$$

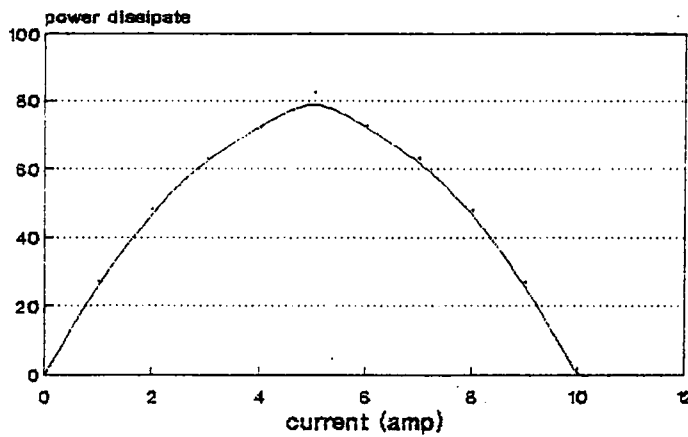
$$V_{FET} = V_s - I(R_L + R_2) - \frac{IR_3}{a}$$

$$\text{พลังงานที่สูญเสียใน FET แต่ละตัว} = V_{FET} \times \frac{I}{6} = P_{diss}$$

$$\begin{aligned} P_{diss} &= \frac{IV_s}{6} - \frac{I^2}{6}(R_L + R_2) - \frac{I^2}{36}R_3 \\ &= I - 5.75I^2 - 0.3125I^2 \\ &= 31.25I - 6.0625I^2 \end{aligned}$$

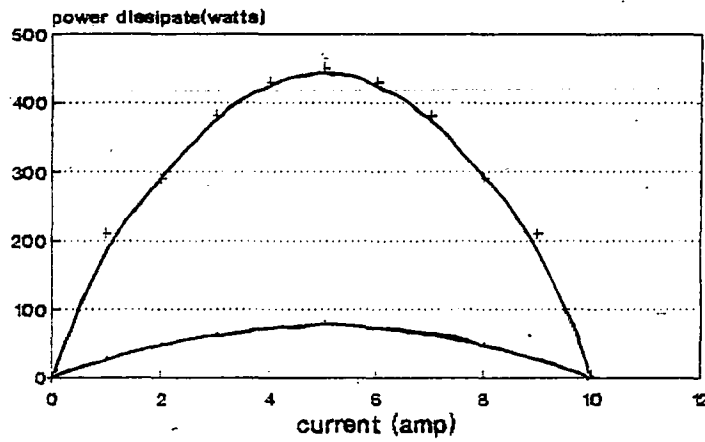
กราฟพลังงานที่สูญเสียในตัว FET แสดงดังรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าพลังงานที่สูญเสียลดลงเหลือ 81 วัตต์ ต่อ FET 1 ตัว ซึ่งทำให้ FET ทำงานได้อย่างปลอดภัย รูปที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่สูญเสียเมื่อใช้ FET 1 ตัวกับ FET 6 ตัว FET ที่ใช้คือเบอร์ IRF 540 ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในภาคผนวก

POWER DISSIPATE six mosfets



รูปที่ 3.8 กำลังสูญเสียใน FET เมื่อใช้ FET 6 ตัว

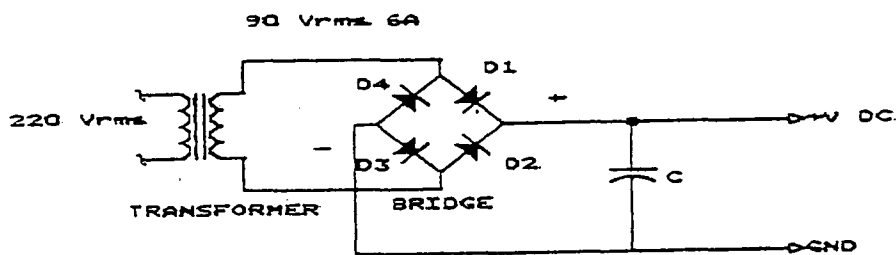
POWER DISSIPATE one & six mosfets



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบกำลังสูญเสียเมื่อใช้ FET 1 ตัวและ FET 6 ตัว

3.1.1.3 ส่วนจ่ายพลังงาน (Power Source)

ส่วนจ่ายพลังงานเป็นแหล่งจ่ายพลังงานกระแสตรง วงจรที่ใช้เป็นดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรแหล่งจ่ายไฟตรง

หากการกระเพื่อม(ripple)ได้จาก

$$V_{r(p-p)} = \frac{I_{dc}}{2fc} = \frac{6}{2 \times 50 \times 8500 \mu F}$$

$$= 9.23 \text{ V}$$

เราจะได้การกระเพื่อมสูงสุดคือ 9.23 V

แรงดันสูงสุดที่ได้จากส่วนเรียงกระแสคือ

$$V_p = V_{dc} + \frac{V_{r(p-p)}}{2}$$

$$= 180 + 9.23$$

$$= 189.23 \text{ V}$$

แรงดันสูงสุดที่ออกจากหม้อแปลงคือ $V_p + 2V_D$

V_D คือแรงดันคร่อมไดโอด คือ 0.7 V

$$= 189.23 + 1.4$$

$$= 190.63 \text{ V}$$

ดังนั้นแรงดัน V_{rms} ที่ออกมาจากขดทุติยภูมิของหม้อแปลงคือ 190.63

๑๒

ประมาณ 134.82 โวลต์

ขนาดของหม้อแปลงคือ

ขดปฐมภูมิมีแรงดัน 220 โวลต์

ขดทุติยภูมิมีแรงดัน 134.82 โวลต์ 10 แอมป์

ขนาดของไดโอด $D_1 - D_4$ ต้องทนกระแสได้มากกว่า $I_o \times 1.2 = 7.2$ แอมป์

๒

แรงดันพังทะลายต้องมากกว่า $1.2 \times (V_p + 2V_D) = 228.75$ โวลต์

3.1.1.4 การสร้างเตาไฟฟ้า

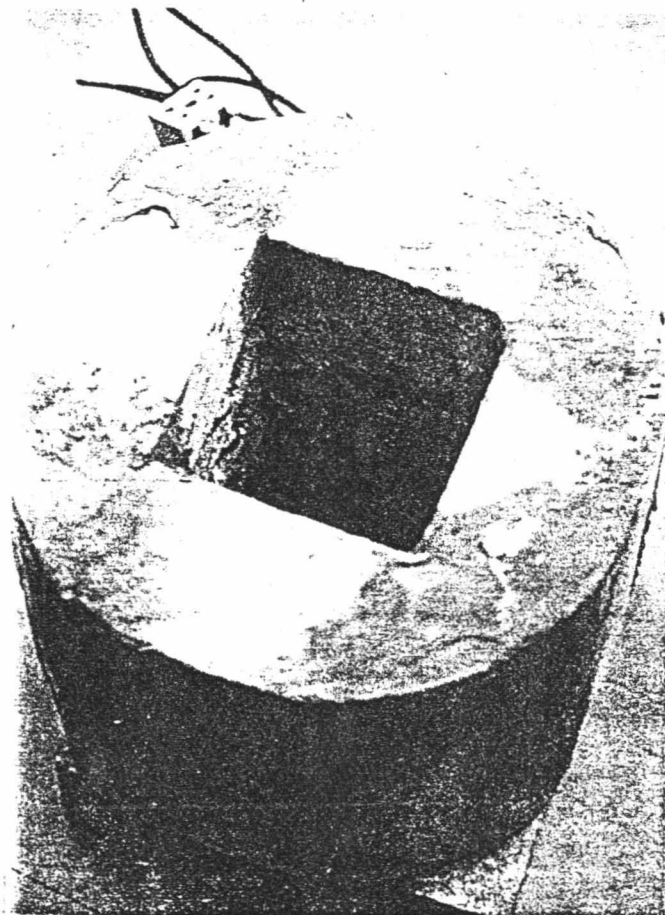
วัสดุที่ใช้ทำเตาประกอบด้วย

1. ขดลวดความร้อนขดลวดความร้อนจะใช้ Khantal-Al ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม.
2. อิฐทนความร้อน

3. ปูนทนความร้อนชนิดที่ผลิตเรียบร้อย แล้วพร้อมใช้งานได้ทันทีจะมีลักษณะคล้ายดินน้ำมัน มีชื่อเรียกทางการค้าว่า Curborundum Resistant Materials มีชื่อรุ่นว่า Fiberstick FFHIO5012-STANDARD 25 KG ผลิตโดย South Coast Refractories pty LTD. จากลักษณะที่คล้ายดินน้ำมันของปูนนี้จึงสามารถใช้งานมันในลักษณะทางสร้างส่วนประกอบเล็ก ๆ และยึดชิ้นส่วนต่าง ๆ ให้อยู่กับที่ เพราะมันสามารถใช้งานได้ง่าย

วิธีและขั้นตอนในการสร้างเตา

1. กำหนดขนาดและลักษณะของเตาที่เหมาะสมกับการใช้งานซึ่งได้แสดงไว้ตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปทรงเตาไฟฟ้า

2. สร้างขดลวดความร้อนให้ได้ความต้านทานตามต้องการ ซึ่งมีค่าประมาณ 17 โอห์ม

3. นำอิฐทนความร้อนที่กัดเซาะร่องแล้ว มาประกอบให้ได้ลักษณะตามรูปที่ 3.3.14

4. นำขดลวดความร้อนที่ได้มาพันเป็นวงในร่อง โดยการพันให้เว้นระยะห่างพอสมควรไม่ให้ขดลวดความร้อนสัมผัสกัน เพราะส่วนที่สัมผัสกันนั้นจะมีความต้านทานสูงกว่าปกติ และเป็นจุดที่มีความร้อนมากที่สุด เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับเตา มาก ๆ แล้วจะทำให้เส้นลวดบริเวณนั้นขาดได้

5. นำปูนทนความร้อนที่มีลักษณะคล้ายดินน้ำมันมาอัดขดลวดความร้อนให้อยู่ในตำแหน่งคงที่และยึดรูปทรงของอิฐทนความร้อนให้ได้รูปทรงตามข้อ 1 และนำไปตากแดดให้แห้ง

3.2 สร้างตัวจับสาร

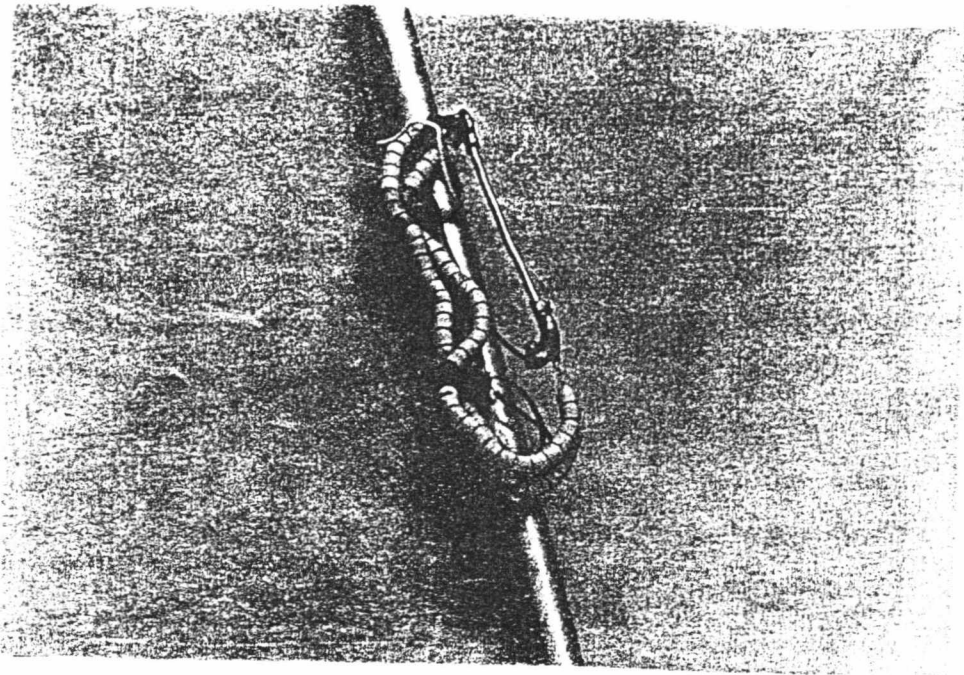
วัสดุที่ใช้

1. ท่ออลูมิเนียม
2. กระจกเบืองเซรามิค
3. สายซิลด์
4. เทอร์โมคัปเปิ้ล
5. หัวจับสาร

ขั้นตอนในการสร้าง

1. นำท่ออลูมิเนียมมาทำการเจาะให้ได้รูซึ่งมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะใส่สายซิลด์ และเทอร์โมคัปเปิ้ลให้มีรูปร่างดังรูปที่ 3.12

2. ใช้กระจกเบืองเซรามิคยึดติดกับท่ออลูมิเนียมเพื่อทำหน้าที่รองรับหัวจับ และสารตัวอย่าง ไม่ให้สัมผัสกับท่ออลูมิเนียม



รูปที่ 3.12 หัวจับสาร

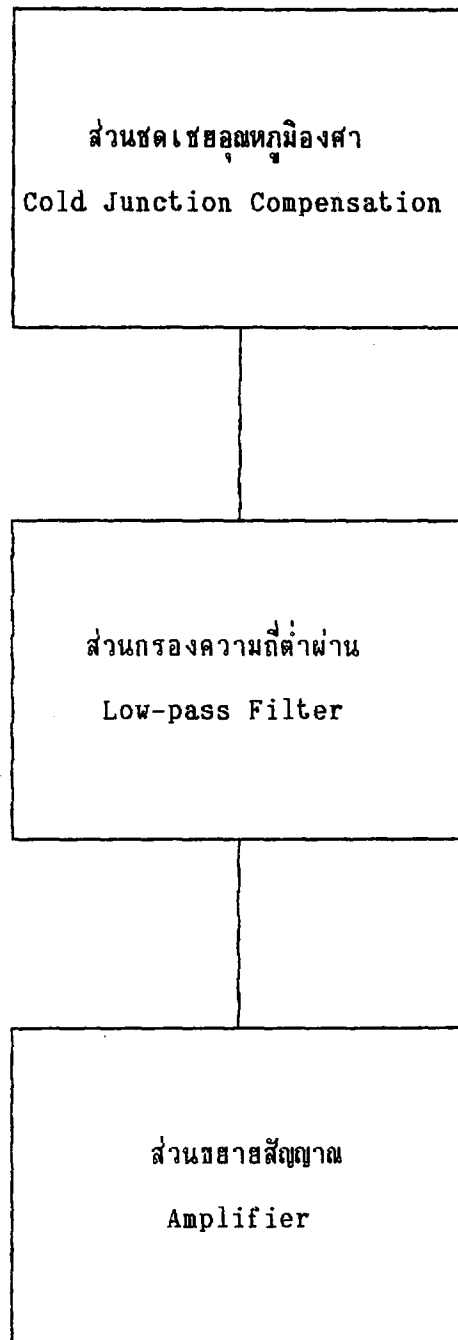
3. นำสายซิลด์และสายเทอร์โมคัปเปิ้ลประกอบกับหัวจับสารดังรูปที่ 3.12

ข้อควรระวัง อย่าให้เทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัสกับหัวจับสาร แต่ให้สัมผัสกับผิวของสารตัวอย่างเท่านั้น

3.3 การสร้างส่วนควบคุมอุณหภูมิคงที่

3.3.1 การสร้างวงจรขยายหัววัดอุณหภูมิ

ในส่วนของวงจรนี้สัญญาณอุณหภูมิที่ต้องการคือ 10 mV/องศา ส่วนประกอบที่จำเป็นในการใช้งานขยายสัญญาณอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.13 ซึ่งประกอบด้วยส่วนวงจรชดเชยอุณหภูมิศูนย์องศา (cold junction compensation), ส่วนกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) และส่วนขยายสัญญาณ (amplifier)

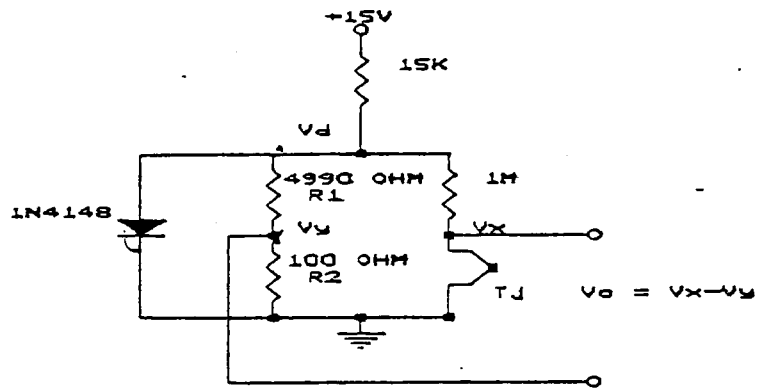


รูปที่ 3.13 ส่วนประกอบของวงจรขยายสัญญาณอุณหภูมิ

ต่อไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของสร้างเป็นสั่วนๆไป

-ส่วนชดเชยอุณหภูมิศูนย์ห้อง (Cold Junction Compensation)

วงจรที่ใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรชุดเซซอนทงมิค่นฮ่งศำ

จากสมการ(2.3)

$$V_{T,d1} = V + V_{ref}$$

จากรูปที่ 3.14 จะได้ว่า

$$V_{T,d1} = \alpha T_d + \alpha T_{ref} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\begin{aligned} V_{T,d1} &= v_o \\ &= V_x - V_y \end{aligned}$$

$$V_{T,d1} = \alpha T_d - \beta T_{ref} \dots\dots\dots(3.2)$$

เปรียบเทียบกับสมการ(3.1)จะได้ว่า $\beta = -\alpha$

สามารถทำให้ที่จุด V_y มีค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิเป็น $-\alpha$ ได้จากการเลือกค่า R1 และ R2 ให้เหมาะสม

$$\text{จาก } V_y = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} V_d$$

$$d(V_v) = \frac{\beta_2}{\beta_1 + \beta_2} d(V_d)$$

เนื่องจากไดโอด 1N4148 มีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงดันเทียบกับอุณหภูมิเป็น -2.1 mV/องศา และ $d(V_v)/dT = \beta = -\alpha$ (เทอร์มิคัมเบิลเชนิต K มี $\alpha = 40 \mu V/องศา$) แทนค่าจะได้

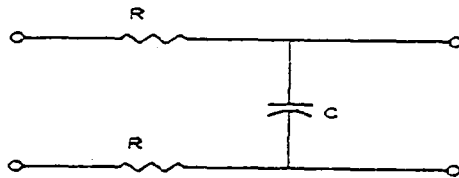
$$-40 \mu V/องศา = \frac{\beta_2}{\beta_1 + \beta_2} (-2.1 mV/องศา)$$

$$R_1 = 49R_2 \dots\dots\dots(3.3)$$

จากนั้นจึงเลือกค่า R1 และ R2 ให้เป็นอัตราส่วนดังสมการที่(3.3)

-ส่วนกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass Filter)

วงจรนี้จะให้ความถี่ที่ต่ำกว่า 1 Hz ผ่านไปได้เท่านั้นเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ ออก วงจรที่ใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากวงจรจะหาจุดตัดความถี่ได้จาก

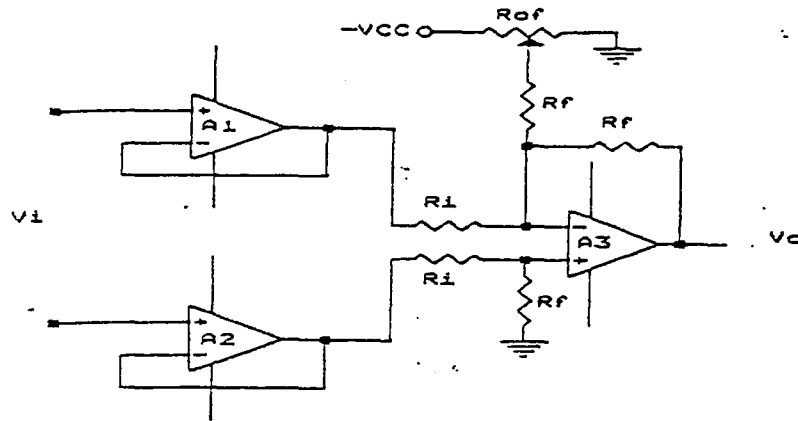
$$f = \frac{1}{2\pi(RC)}$$

โดย R = 100 K , C = 1 μF

เมื่อแทนค่าจะได้จุดตัดความถี่คือ 0.795 Hz

- ส่วนขยายสัญญาณ (Amplifier)

ส่วนนี้ทำหน้าที่ปรับสัญญาณที่ได้ให้มีค่า 10 mV/องศา โดยการปรับอัตราขยายของวงจรขยาย
วงจรที่ใช้งานแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 วงจรขยายสัญญาณ

A1 ,A2 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์(Buffer) เพื่อไม่ให้อิมพีแดนซ์ของวงจรส่วนหน้ามารบกวน
วงจรขยาย ,A3 ทำหน้าที่ขยายโดยมีอัตราขยายคือ $-R_f/R_i$ เราสามารถหาอัตราขยายได้จาก

$$V_o = AV_i$$

$$\frac{d(V_o)}{dT} = A \frac{d(V_i)}{dT}$$

แต่ $d(V_o)/dT = 10 \text{ mV/องศา}$ และ $d(V_i)/dT = 40 \text{ } \mu\text{V/องศา}$

แทนค่า

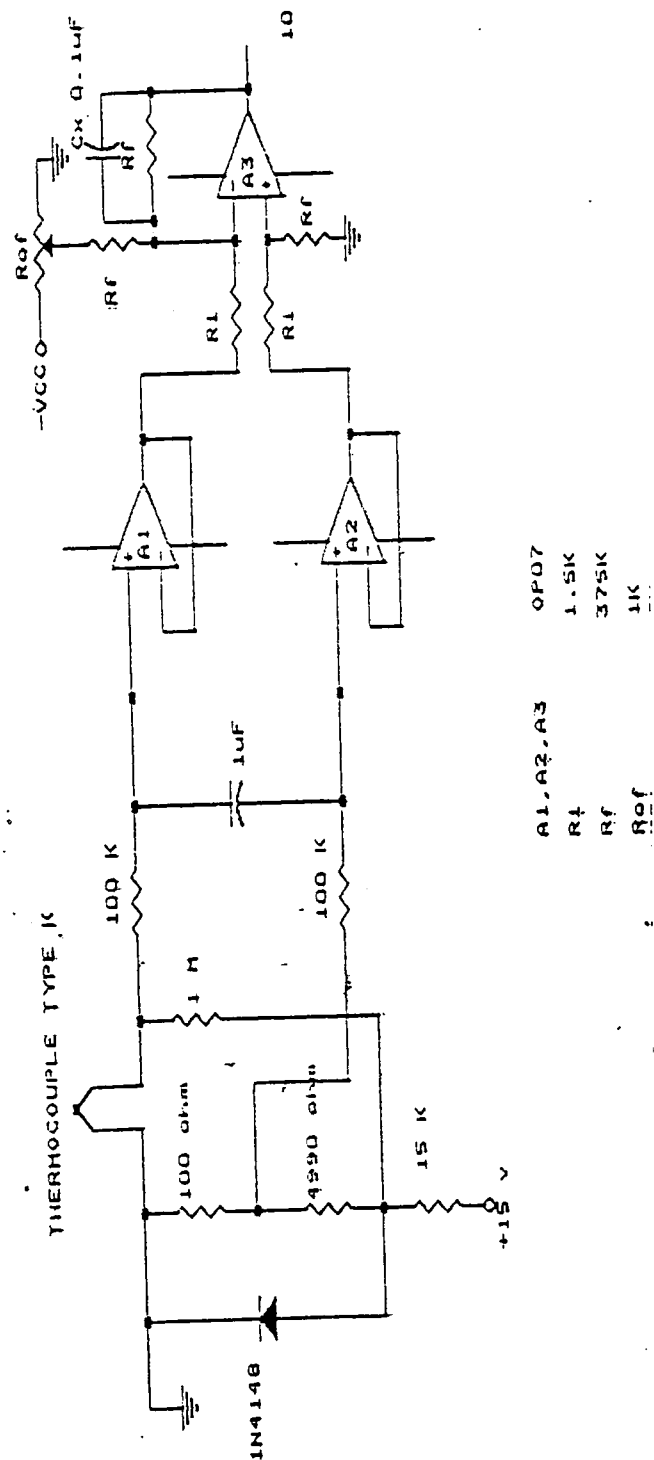
$$A = \frac{d(V_o)}{d(T)} \times \frac{d(T)}{d(V_i)}$$

$$= \frac{10 \times 10^{-3}}{40 \times 10^{-6}}$$

$$= 250$$

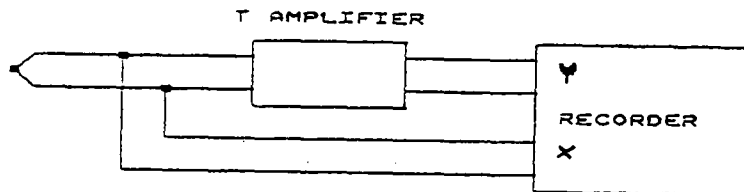
ถ้าให้ $R_i = 1.5 \text{ K}$ จะได้ $R_f = 375 \text{ K}$

เมื่อนำวงจรที่ได้ออกแบบไว้ทั้งหมดมารวมกันจะได้เป็นวงจรที่สมบูรณ์ดังในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรรวมของส่วนขยายสัญญาณหัววัดอุณหภูมิ

ต่อไปเป็นการทดลองหาค่าเอาต์พุตที่ได้ว่าเป็น 10 mV/องศา ตามที่คำนวณไว้หรือไม่ โดยต่อวงจรทดลองดังรูปที่ 3.18



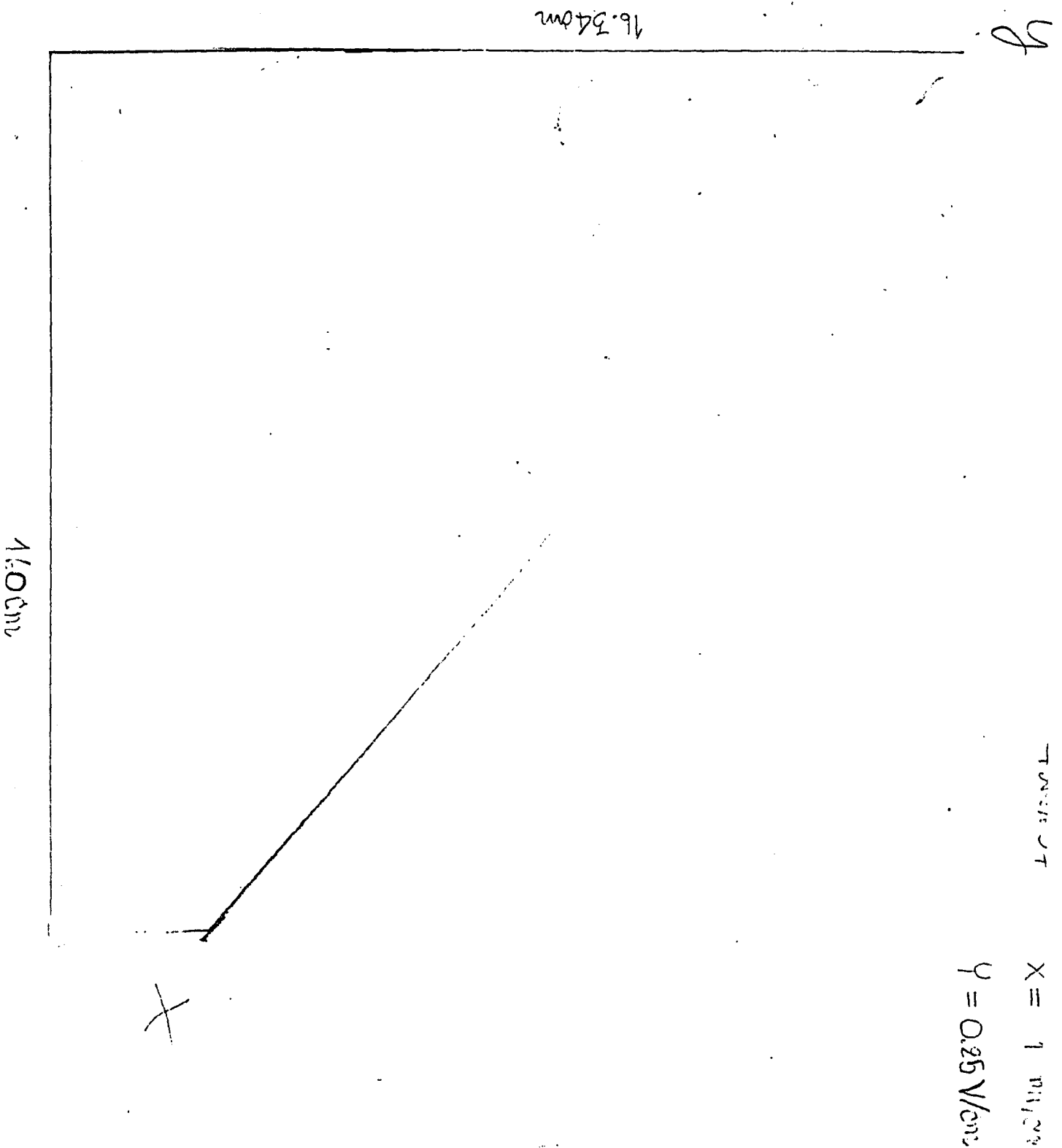
รูปที่ 3.18 การทดสอบวงจรขยายที่สร้างขึ้น

จากรูปจะนำสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิลมาเข้า ตัวบันทึกผล x-y ทางแกน x และนำสัญญาณเดียวกันนี้มาเข้าอินพุตของวงจรที่สร้างขึ้น และเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเข้าทางแกน y จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิให้เทอร์โมคัปเปิลโดยใช้ไฟเผา เราก็จะได้กราฟคุณสมบัติของวงจรที่สร้างขึ้น ถ้าเราแปลงค่าสัญญาณทางแกน x ให้เป็นอุณหภูมิโดยคูณด้วยสัมประสิทธิ์ของซีเบค จากนั้นก็หาความชันของกราฟก็จะอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตกับอุณหภูมิที่วัด ซึ่งควรจะได้เป็น 10 mV/องศา ถ้ายังไม่ได้ให้ปรับค่า R_{t} แล้วทดลองใหม่จนกว่าจะได้

เมื่อวงจรทุกอย่างพร้อมจะต้องมีการปรับเทียบจากค่ามาตรฐานที่เชื่อถือได้ก่อนนำไปใช้งาน ในที่นี้ใช้ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์ของ Fluke รุ่น 51 เป็นตัวอ้างอิงโดยวัดที่อุณหภูมิห้องแล้วปรับเทียบตามเช่น ถ้า Fluke อ่านได้ 25 องศา สัญญาณเอาต์พุตที่วัดได้ต้องเป็น 250 mV ถ้าไม่ได้ให้ปรับ R_{t} จนกว่าจะได้

วงจรขยายสัญญาณอุณหภูมิที่ต้องการคือ 10 mV/องศา กับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งจากการทำการทดลองโดยใช้วงจรในรูปที่ 3.18 ได้ผลแสดงออกมามีรูปที่

3.19



รูปที่ 3.19 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดัน

แกน x เป็นเอาต์พุตจากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าเป็น $40 \mu\text{V}/\text{องศา}$
 จากกราฟจะได้ค่าอุณหภูมิเป็น

$$\begin{aligned} \text{x-axis} &= 16 \times 1 \text{ mV} \\ &= 16 \text{ mV} \\ &= \frac{0.016}{40 \mu\text{V}} \\ &= 400 \text{ องศา} \end{aligned}$$

แกน y เป็นเอาต์พุตจากวงจรขยาย มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \text{y-axis} &= 16.34 \times 0.25 \\ &= 4.085 \text{ V} \end{aligned}$$

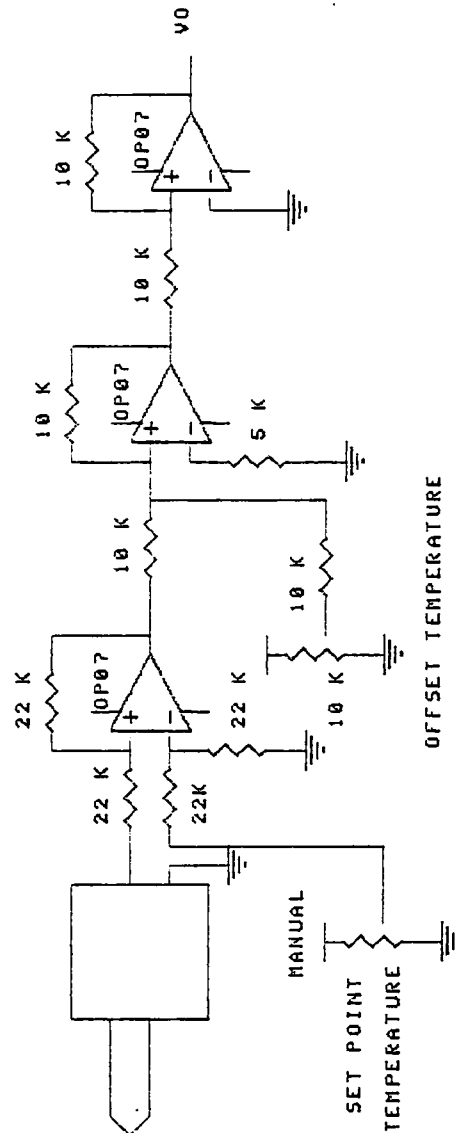
$$\frac{\text{y}}{\text{x}} = \frac{4.085}{400}$$

$$= 10.2 \text{ mV}/\text{องศา}$$

วงจรที่สร้างขึ้นมีเอาต์พุตเป็น $10.2 \text{ mV}/\text{องศา}$

3.3.2 วงจรควบคุมแบบ Proportional controller

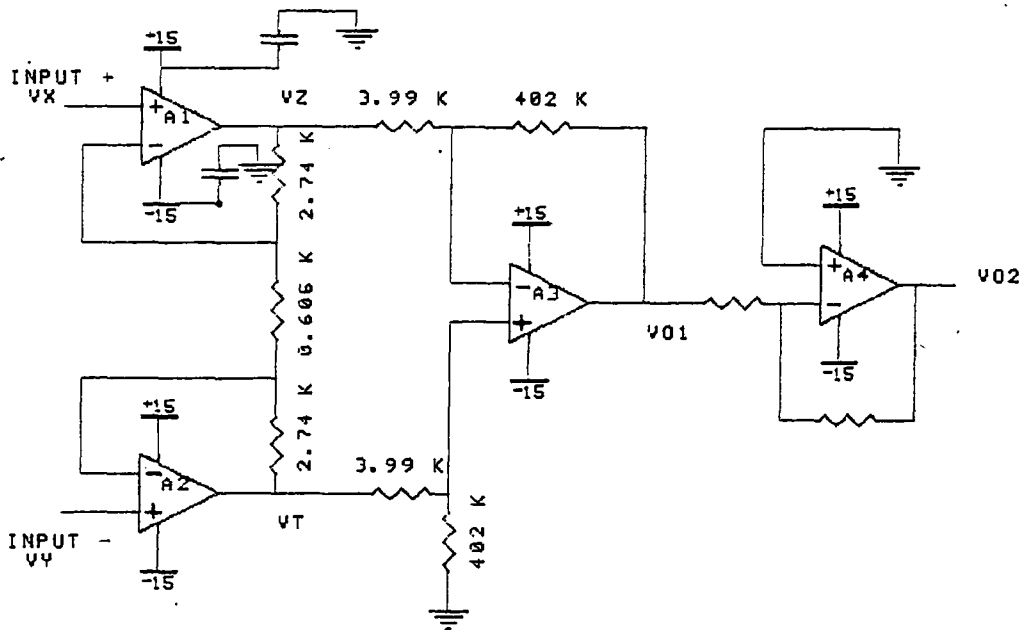
นำหัววัดอุณหภูมิที่ได้มาเป็นค่า pv ในวงจร Proportional controller



รูปที่ 3.19 วงจรควบคุมแบบ Proportional controller

3.4 วงจรขยายความแตกต่างอุณหภูมิชีวบน และล่างของสารตัวอย่าง

จากหลักการออกแบบวงจรขยายที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เราทำการหาไอซีออปแอมป์ที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง และประกอบเป็นวงจร โดยเลือกใช้อัตราขยายมีค่า 1038 และใช้อุปกรณ์ตัวต้านทานค่าต่าง ๆ เพื่อให้ได้อัตราขยายที่ต้องการ รวมทั้งใช้ตัวเก็บประจุ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน ดังรูป 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรขยายสัญญาณความแตกต่างอุณหภูมิชีวบน และล่างของสารตัวอย่าง

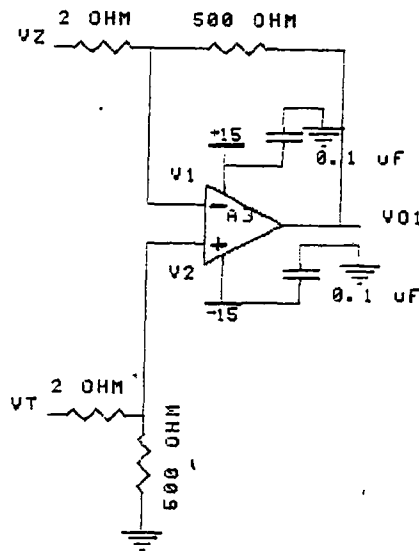
$$V_o = (-R_{e2}/R_{e1}) \cdot (-R_4 / R_3) \cdot (2R_2 + R_1 / R_1) V_{xv}$$

$$\begin{aligned} A_v &= -1(-402 \text{ k}/3.99 \text{ k}) \cdot (2(2.74 \text{ k} + 0.605 \text{ k}/0.605 \text{ k})) \\ &= 1038 \end{aligned}$$

3.5 วงจรขยายสัญญาณซีเบคโวลต์เตก

เราประกอบวงจรขยายความต่าง โดยใช้ออปแอมป์ตัวเดียว โดยเลือกใช้อัตราขยายมีค่า 250 ดังนั้นจึงเลือกใช้อุปกรณ์ตัวต้านทานเพื่อให้ได้อัตราขยายที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.21

$$\begin{aligned} V_o / V_{xy} &= -R_4 / R_3 \\ A_v &= 500 / 2 \\ &= 250 \end{aligned}$$



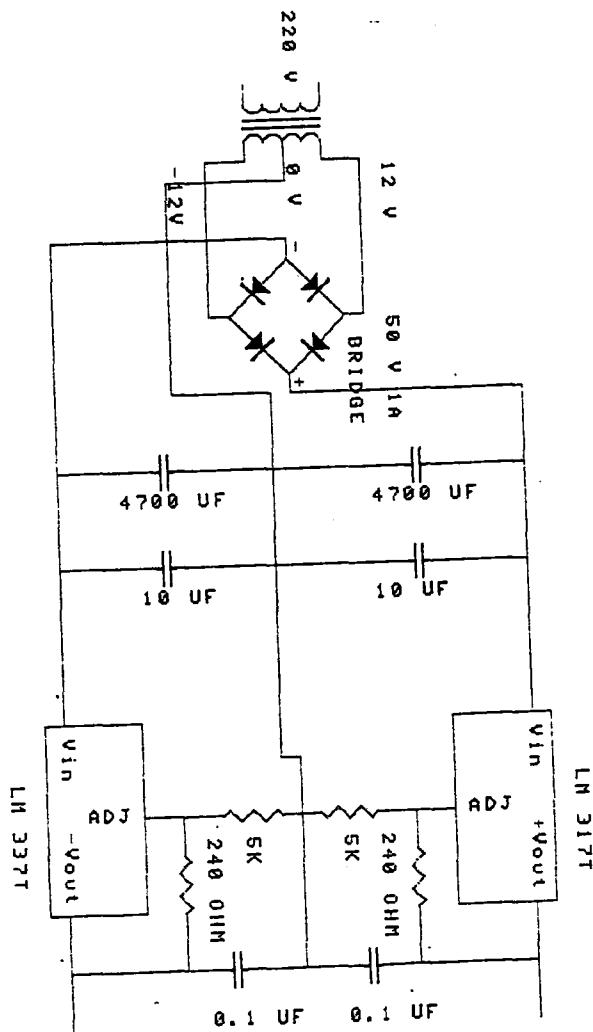
รูปที่ 3.21 วงจรขยายสัญญาณซีเบคโวลต์เตก

3.6 การประกอบเข้าชุดทั้งหมด

เมื่อเราสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว เราต้องนำทุกส่วนมาประกอบเข้าด้วยกันจึงทำงานได้ เพื่อให้ทุกอย่างสามารถทำงานร่วมกันได้และเพื่อความสะดวกในการใช้งาน เราจึงสร้างอุปกรณ์บางอย่างเพิ่มเติมขึ้นมาอีกเล็กน้อย คือแหล่งกำเนิดแรงดัน +15V และ -15V สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

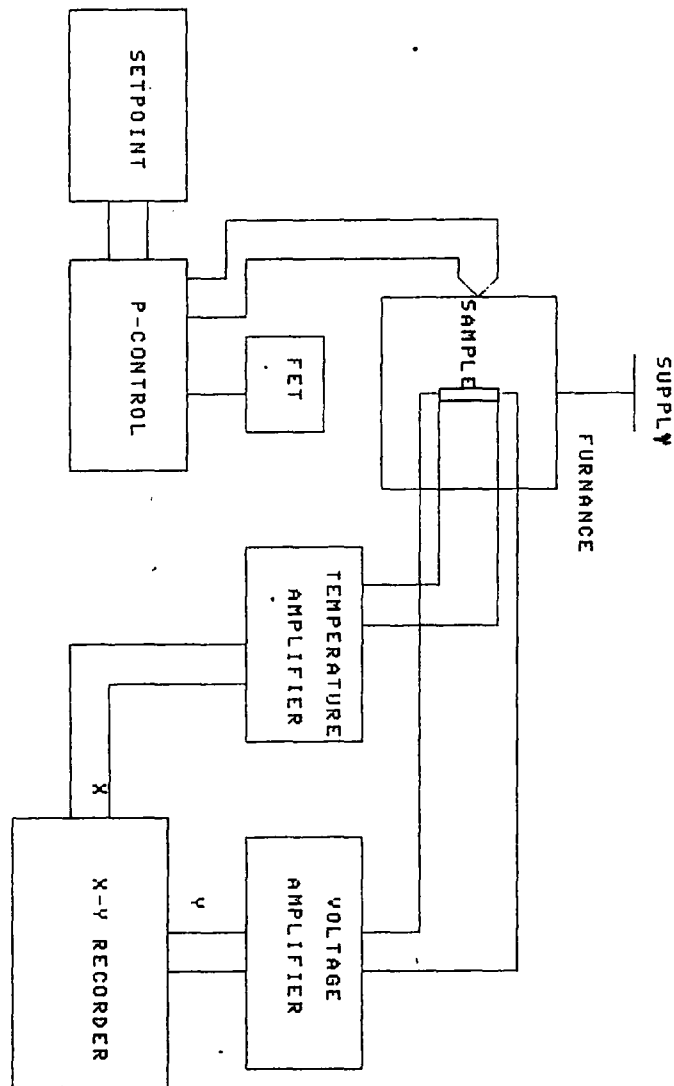
แหล่งกำเนิดแรงดัน +15V และ -15V สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์

แหล่งกำเนิดแรงดันมี 3 ชุด คือ +15V และ -15V จำนวนทั้งหมด 3 ชุด สำหรับ วงจรขยายสัญญาณ และวงจรควบคุมอุณหภูมิ สาเหตุที่ต้องทำหลายชุดเพราะต้องการแยกไม่ให้เกิดการรบกวนซึ่งกัน และ กัน ทางแหล่งกำเนิดแรงดัน ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของวงจรขยาย ลดลง วงจรแหล่งกำเนิดแรงดันทั้ง 3 ชุด มีลักษณะเหมือนกันดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 วงจรแหล่งกำเนิดแรงดัน +15 V และ -15 V

เราสามารถทำการรวมทุกส่วนเข้าด้วยกันตามรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 วงจรรวมส่วนประกอบต่าง ๆ ของชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

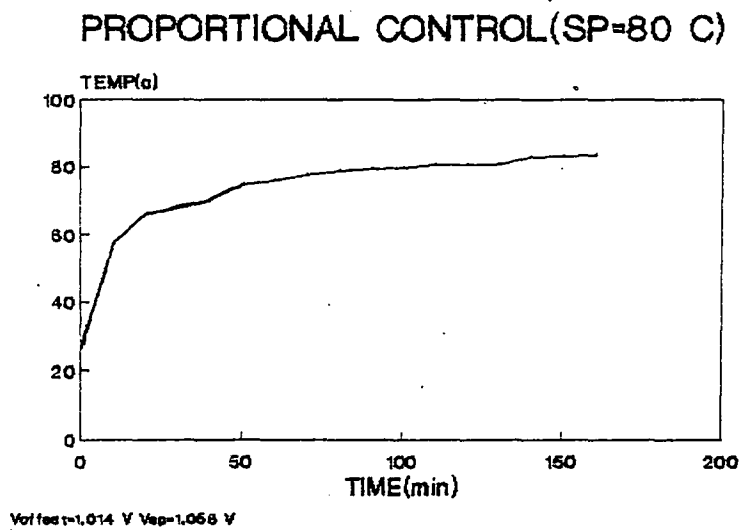
บทที่ 4

การทดสอบส่วนต่าง ๆ ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค และวิจารณ์

เราสามารถทำการทดสอบส่วนต่าง ๆ ดังนี้

4.1 ผลการทดสอบวงจรควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อน

เราทำการทดสอบที่อุณหภูมิ โดยแสดงเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิกับเวลา



รูปที่ 4.1 ผลการทดลองควบคุมอุณหภูมิ

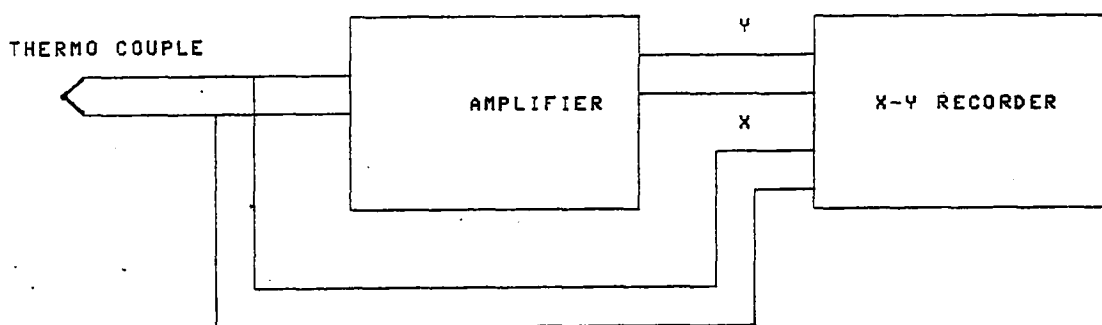
พิจารณาวงจรควบคุมอุณหภูมิคงที่ แบบ Proportional controller ถ้าสัญญาณค่าคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ คืออุณหภูมิจริงในเตาเท่ากับอุณหภูมิเป้าหมาย ดังนั้นสัญญาณที่ส่งไปควบคุม คือค่าสัญญาณออฟเซตเพียงอย่างเดียว ถ้าค่าออฟเซตมีค่าน้อย จะทำให้พลังงานที่จ่ายให้เตามีค่าน้อยด้วย ซึ่งไม่เพียงพอที่จะรักษาอุณหภูมิให้เท่ากับค่าเป้าหมายได้ อุณหภูมิจึงลดลง และการควบคุมจึงกลับคืนสู่การควบคุมแบบ Proportional ตามปกติ จนกว่าค่าคลาดเคลื่อนจะเป็นศูนย์อีก จากปรากฏการณ์ดังกล่าว ถ้าระบบมีความเฉื่อยสูงการควบคุมจะไม่สามารถทำให้อุณหภูมิเป็นไปตามค่าเป้าหมายได้เลย จะต้องทำการทดลองเพื่อให้ได้ ค่าออฟเซตที่เหมาะสมเท่านั้นจึงจะทำให้อุณหภูมิเป็นไปตามค่าเป้าหมายได้ และเราสามารถปรับเปลี่ยนค่าออฟเซตได้จากการเปลี่ยนค่าความต้านทาน

4.2 การทดสอบวงจรขยาย

เนื่องจากวงจรขยายที่สร้างขึ้นมา อาจมีอัตราขยายคลาดเคลื่อนจากที่ต้องการเนื่องจากสาเหตุหลายประการ อาทิเช่นค่าความคลาดเคลื่อนของตัวต้านทาน หรือ การเชื่อมจุดต่าง ๆ ในวงจรบกพร่อง เป็นต้น เราจึงต้องทดสอบวงจรขยายเพื่อหาค่าอัตราขยายที่แท้จริง เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณผลการทดลอง หาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคต่อไป

วิธีการทดสอบ

1. ตัวอย่างจรงรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการต่อวงจรทดสอบอัตราขยาย

2. ทำการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตให้กับวงจร โดยอินพุตที่ใช้คือ สัญญาณของเทอร์โมคัปเปิ้ล ซึ่งทำการเผาเพื่อให้สัญญาณอินพุตเกิดการเปลี่ยนแปลง

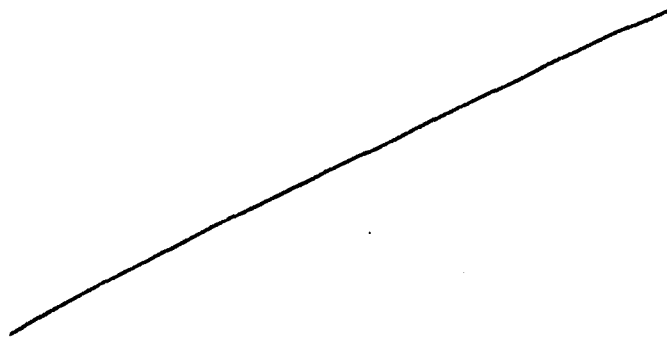
3. บันทึกค่าสัญญาณอินพุต และ เอาท์พุทที่ได้จากวงจร โดยใช้ X - Y RECORDER โดยแกน X เป็นสัญญาณอินพุต และแกน Y เป็นสัญญาณเอาท์พุท

4. ทำการคำนวณหาความชันของกราฟ ซึ่งก็คืออัตราขยายของวงจร

5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึง ข้อ 4 เพื่อนำมาหาค่าฐานนิยมของอัตราขยายสัญญาณ เพื่อความถูกต้องในการคำนวณ

ผลการทดสอบ

จากการทดสอบเราได้ค่าอัตราขยายสัญญาณเป็นดังตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณค่าได้ดังนี้



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างกราฟที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราขยายจากข้อมูลดิบ

ค่าจริงในแนวแกน X = ระยะทางจากกราฟในแนวแกน X x ค่าสเกลในแนวแกน X ของ X-Y Recorder

ค่าจริงในแนวแกน Y = ระยะทางจากกราฟในแนวแกน Y x ค่าสเกลในแนวแกน Y ของ X-Y Recorder

$$\text{ค่าอัตราขยายที่ได้} = \frac{\text{ค่าจริงในแนวแกน X}}{\text{ค่าจริงในแนวแกน Y}}$$

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบอัตราขยายของวงจรที่สร้างขึ้น

ทดลอง ครั้งที่	อัตราขยาย ΔV	อัตราขยาย ΔT
1	207.5	1050
2	205	1075
3	207.5	1050
4	207.5	1050
5	207.5	1037.5

จากการทดลอง 5 ครั้งที่ได้ เราจะเลือกค่าที่ใช้เป็นค่าฐานนิยมซึ่งจะได้ว่า

อัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เบคได้เป็น 207.5

คำนวณได้ 250 ดังนั้นผิดพลาด 20 เปอร์เซ็นต์ ใช้ R มีค่าผิดพลาด 5%

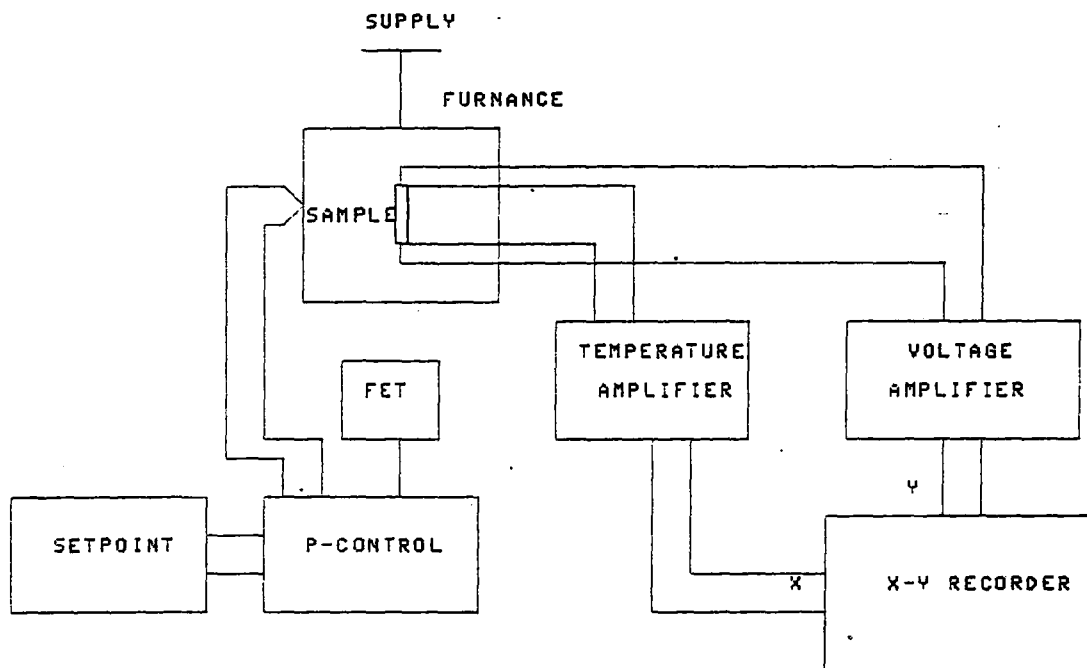
อัตราขยายของวงจรขยายความแตกต่างอุณหภูมิได้เป็น 1050

คำนวณได้ 1038 ดังนั้นผิดพลาด 1 เปอร์เซ็นต์ ใช้ R มีค่าผิดพลาด 1%

จะพบว่าถ้าต้องการให้อัตราขยายผิดพลาดน้อยจะต้องใช้ R 1% ทุกตัว

หมายเหตุ ข้อมูลดิบของกราฟที่คำนวณอัตราขยายอยู่ในภาคผนวก

วิธีทดลอง



รูปที่ 4.4 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง (27°C)

1. ติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.4

2. ทำให้อุณหภูมิของ T1 และ T2 มีความแตกต่างกัน โดยใช้ลมร้อนเป่า (หรือใช้ไฟแช็คเผาต่างๆ พอประมาณ)

3. ทำการบันทึกผลโดยใช้ X-Y Recorder โดยให้แกน X คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิของ T1 และ T2 ของสารตัวอย่าง แกน Y คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าซีเบค

ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 27°C

1. ปรับเตาความร้อนให้มีอุณหภูมิ 35°C

2. ทำให้อุณหภูมิของ T1 และ T2 มีความแตกต่างกัน โดยใช้ลมร้อนเป่า (หรือใช้ไฟแช็คเผาต่างๆ พอประมาณ)

3. ทำการบันทึกผลโดยใช้ X-Y Recorder โดยให้แกน X คือ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิของ T1

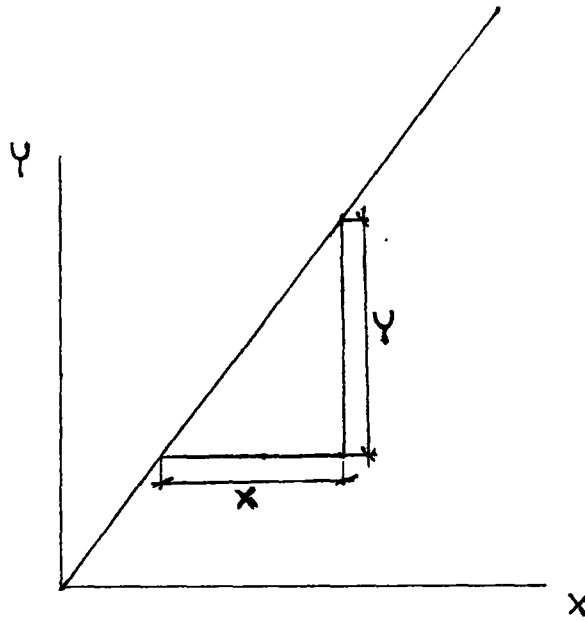
และ T2 ของสารตัวอย่าง แกน Y คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าซีเบค

4. ทำการเพิ่มอุณหภูมิของเตาไฟฟ้าให้สูงขึ้น 5°C แล้วทำการทดลองซ้ำตามข้อที่ 1-3 จนกระทั่งอุณหภูมิของเตามีค่า 100°C

5. นำผลการทดลองที่ได้ จากการทดลองทั้งที่อุณหภูมิต่ำ และผลที่ได้จากการทดลองสูงกว่า-อุณหภูมิห้องมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทำการบันทึกผล

6. นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิโดยให้แกน X เป็นค่าอุณหภูมิ แกน Y เป็นค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค

7. นำผลการทดลองที่ได้มาเขียนกราฟสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับส่วนกลับอุณหภูมิโดยให้แกน X เป็นค่าส่วนกลับอุณหภูมิ แกน Y เป็นค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างแสดงการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจากข้อมูลดิบ

ค่าที่ได้ในแนวแกน Y คือค่าแรงดันไฟฟ้าซีเบค

ค่าที่ได้ในแนวแกน X คือค่าความแตกต่างอุณหภูมิ

ค่าจริงในแนวแกน X = ระยะทางจากกราฟในแนวแกน X x ค่าสเกลในแนวแกน X ของ X-Y Recorder

ค่าจริงในแนวแกน Y = ระยะทางจากกราฟในแนวแกน Y x ค่าสเกลในแนวแกน Y ของ X-Y Recorder

นำค่าจริงในแนวกแน X ไปเปิดตารางค่าความสัมพันธ์ระหว่าง เทอร์โมคัปเปิ้ลกับค่าแรง-
ดันไฟฟ้าซีเบค เพื่อหาค่าความแตกต่างอุณหภูมิจากหน่วย μV เป็นหน่วยของศา K

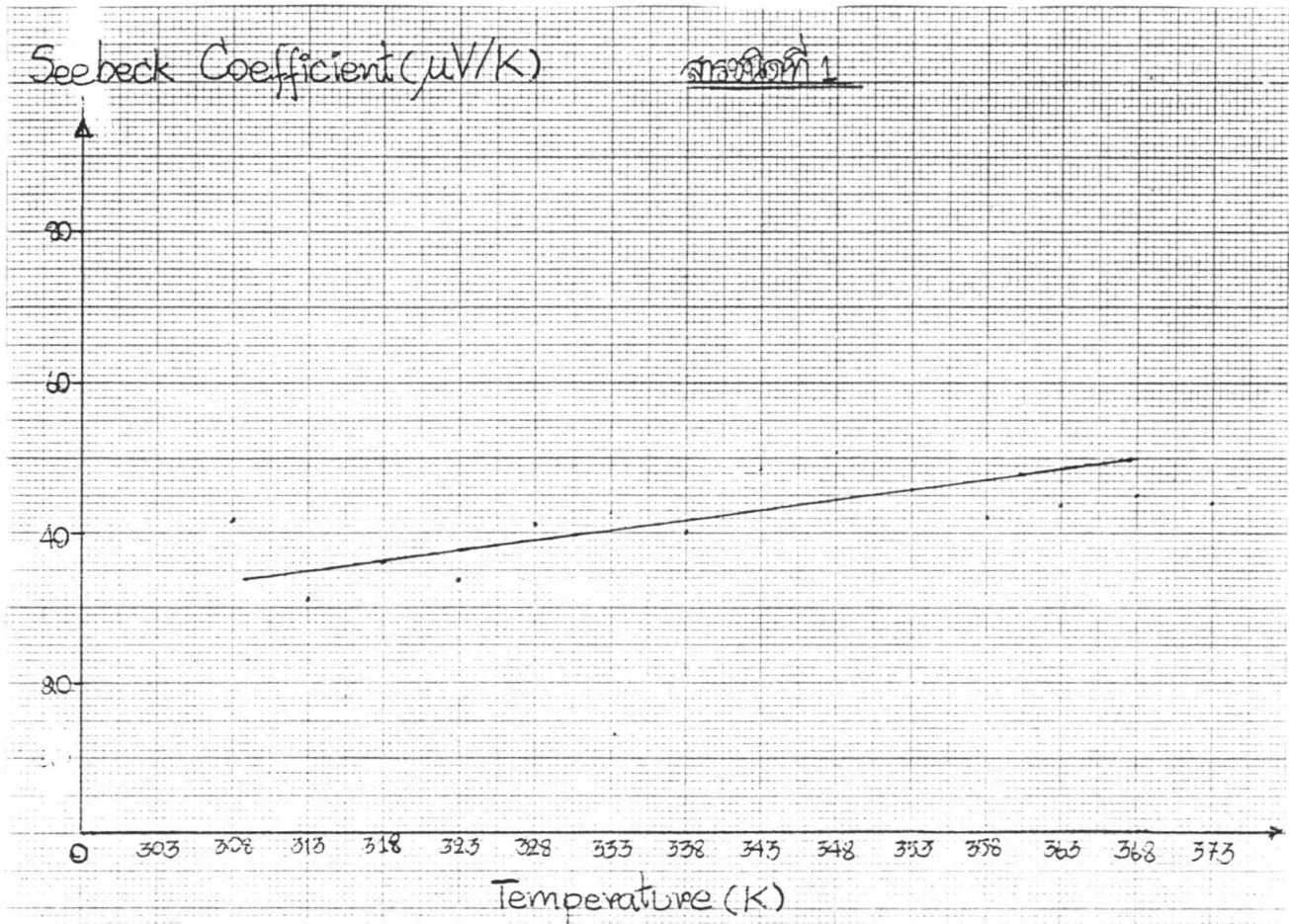
การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (S)

$$S = \frac{\Delta V (\mu V)}{\Delta T (K)}$$

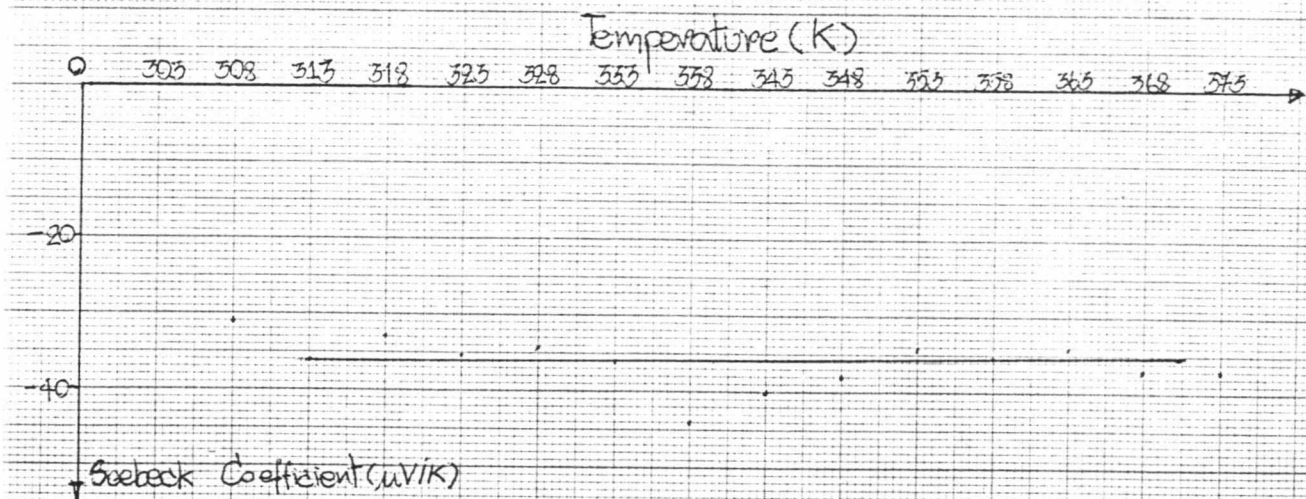
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (K)	สารชนิด 1 ($\mu V/K$)	สารชนิด 2 ($\mu V/K$)
308	41.494	-31.120
313	31.120	-36.307
318	36.307	-32.849
323	33.735	-35.422
328	41.011	-34.578
333	42.631	-36.307
338	40.124	-44.606
343	48.578	-40.381
348	50.602	-38.255
353	45.643	-34.578
358	42.224	-35.422
363	43.502	-34.578
368	45.139	-37.193
373	44.206	-37.193

หมายเหตุ ข้อมูลดิบของกราฟที่คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคอยู่ในภาคผนวก



สารชนิดที่ 2



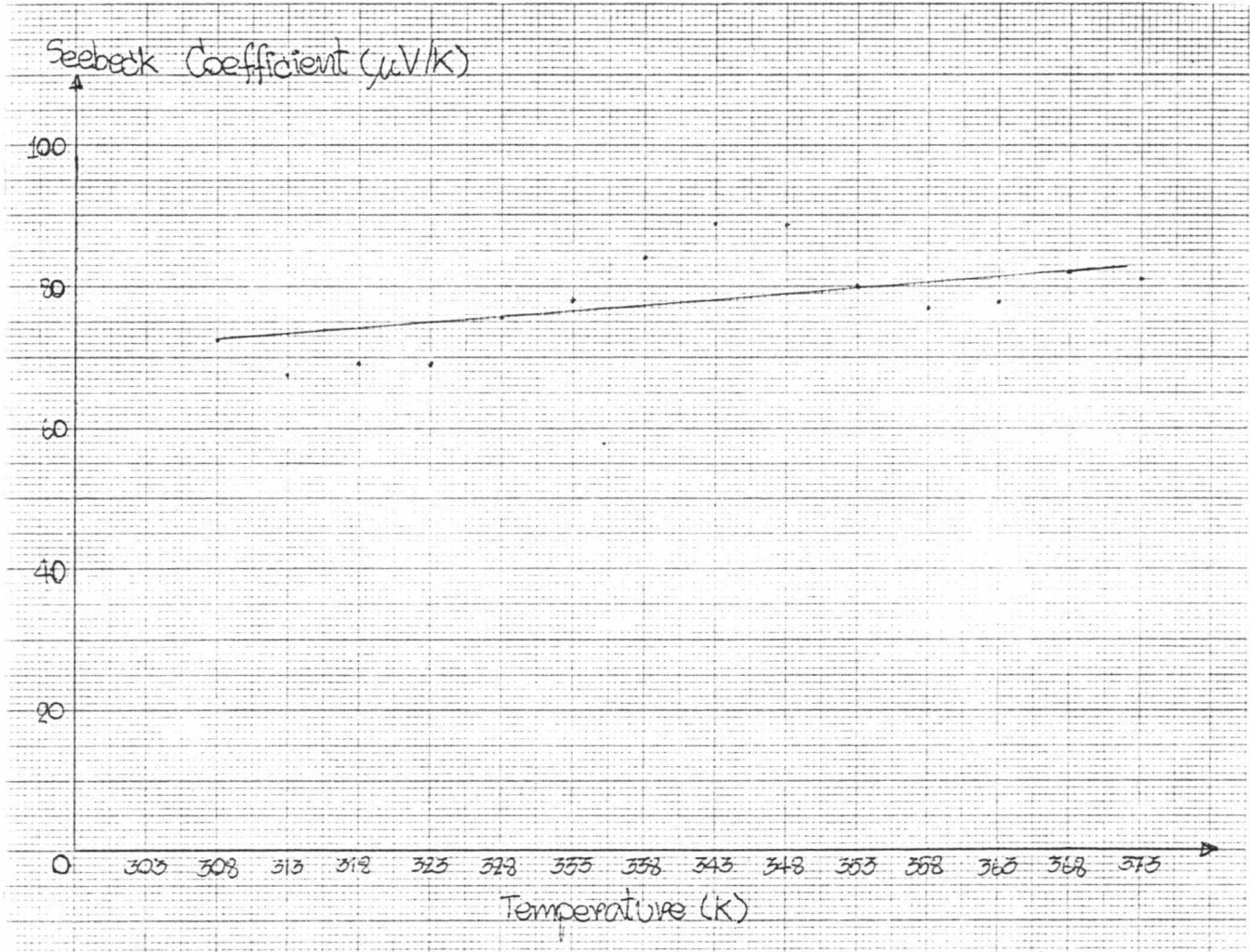
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และวิจารณ์

จากการทดลองตรวจวัดค่า สัมประสิทธิ์ซีเบคของสารตัวอย่าง ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ สองชนิด จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคจะมีค่าต่างกัน ซึ่งทำให้สามารถนำมาใช้พิจารณาชนิดของสารกึ่งตัวนำได้ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังนี้

อุณหภูมิ (K)	สารชนิด 1 ($\mu\text{V/K}$)	สารชนิด 2 ($\mu\text{V/K}$)	ผลรวม ($\mu\text{V/K}$)
308	41.494	-31.120	72.614
313	31.120	-36.307	67.427
318	36.307	-32.849	69.156
323	33.735	-35.422	69.157
328	41.011	-34.578	75.589
333	42.631	-36.307	78.938
338	40.124	-44.606	84.730
343	48.578	-40.381	88.959
348	50.602	-38.255	88.857
353	45.643	-34.578	80.221
358	42.224	-35.422	77.646
363	43.502	-34.578	78.080
368	45.139	-37.193	82.332
373	44.206	-37.193	81.399



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (สารชนิด 1 รวมกับสารชนิด 2) กับอุณหภูมิ

จากกราฟจะเห็นได้ว่า สารชนิดที่ 1 มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่มีค่าเป็นบวก เพราะฉะนั้นจึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี(P-type) ส่วนสารชนิดที่ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่มีค่าเป็นลบ เพราะฉะนั้นจึงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(N-type)

จากรูปที่ 2.12 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ซีเบคกับอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ล type K เราจะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่ได้จริงมีค่าประมาณ 40-45V/C ซึ่งค่าที่ได้จากการทดลองจริง คือ ประมาณ 80 $\mu\text{V}/\text{C}$ และมีค่าคงที่ตลอดการทดลองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 0-100 C จึงพบว่าสารทั้งสองเหมาะที่นำมาทำเทอร์โมคัปเปิ้ลวัดในอุณหภูมิตั้งแต่ 0-100 C และที่อุณหภูมิต่าง ๆ ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากความผิดพลาด เช่น อุณหภูมิที่ทำการทดลองไม่คงที่อย่างแท้จริง หรือรอยต่อระหว่างสารและหัวจับสารไม่สนิท เป็นต้น

จากการทดลองเครื่องตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคใช้งานได้ผลดี ระดับหนึ่ง คือการบ่งบอกชนิดของสารกึ่งตัวนำ แต่การวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคที่แท้จริงยังมีความผิดพลาดอยู่ จำเป็นต้องหาจุดผิดพลาด และปรับปรุงแก้ไขต่อไป

จากการทดลองใช้งานจะเห็นว่าความผิดพลาด เนื่องจากการวัดเป็นความผิดพลาดที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของชุดตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคลดลง

ดังนั้นในการปรับปรุงแก้ไขนั้นสามารถทำได้โดยนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำการประมวลผลสะดวกขึ้นอีกทั้งความผิดพลาดเนื่องจากการวัดจะหมดไป ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาในทางการค้าได้

เอกสารอ้างอิง

1. J.Michael Jacob, Industrial Control Electronics, pp 166-179, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989
2. นายพิพนธ์ กนกบรรณก, นายศุภชัย สายพิมพ์ , การสร้างเครื่องคิดฟลอเรนเชียลเทอร์มอลอนาไลซิส , ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยี่พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536

ภาคผนวก

ก. ข้อมูลการทดสอบวงจรขยาย ความแตกต่างอณหภูมิที่วบน และ ที่วล่าง

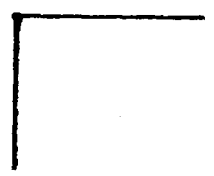
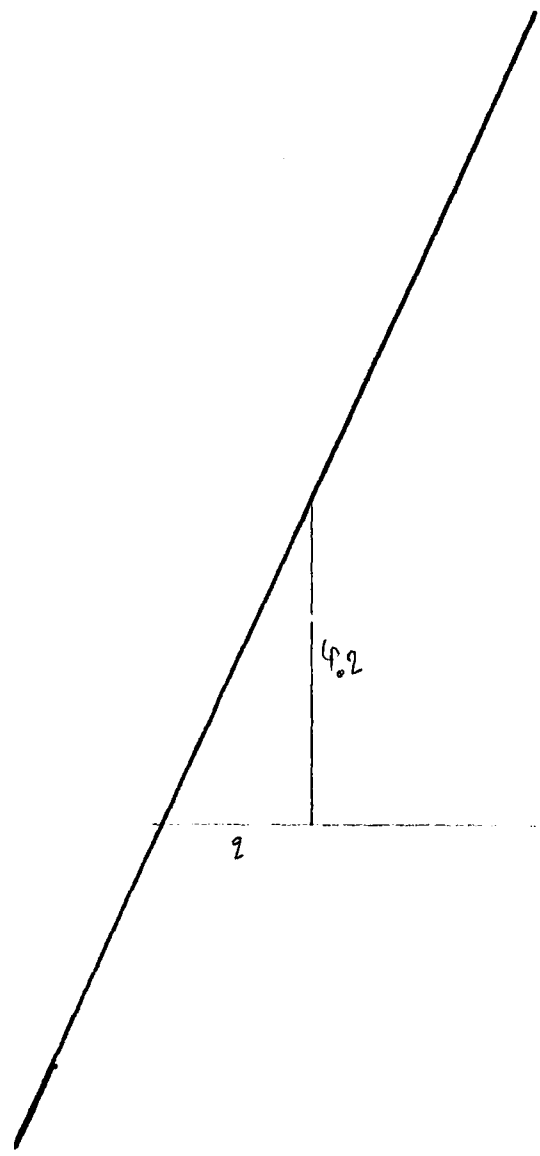
27/01/2024

Gain AT

$y: 0.25 \text{ V/cm}$

$x: 0.5 \text{ ml/cm}$

y
x



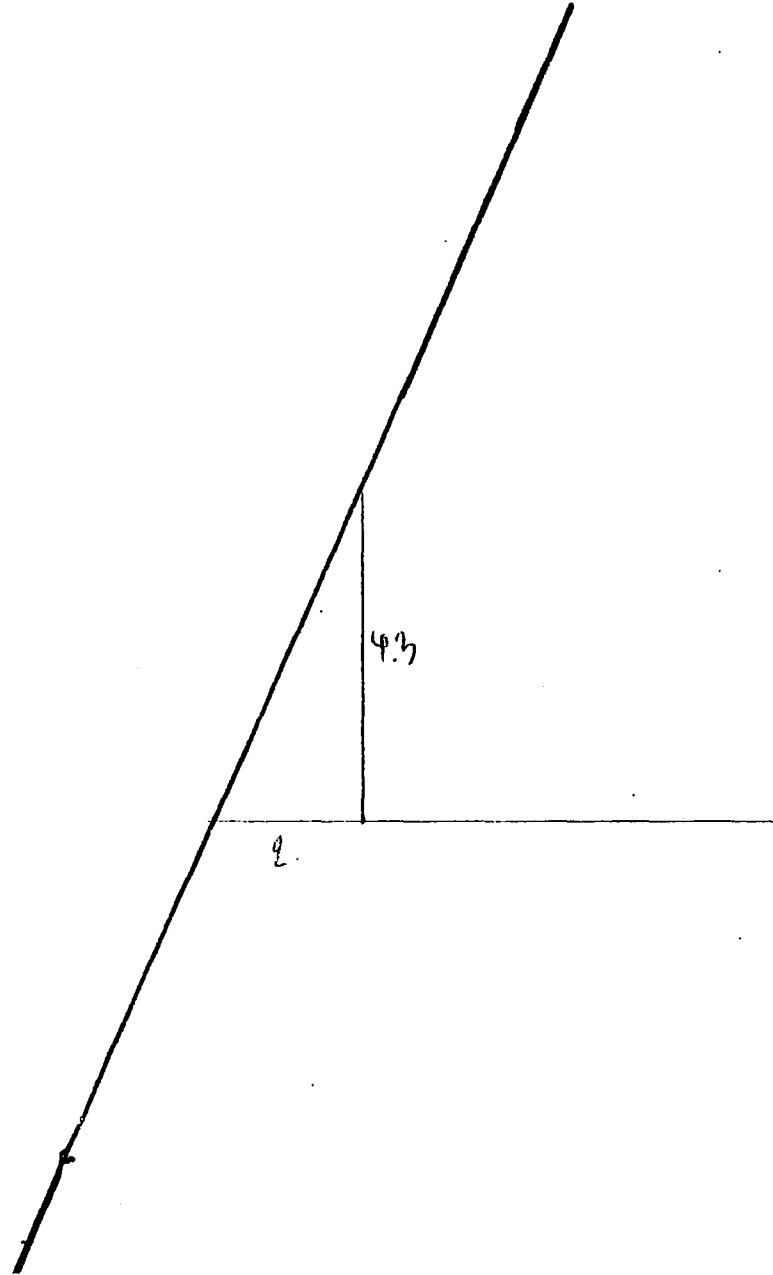
#12R77

Gain ΔT

y: 0.25 V/cm

x: 0.5 mV/cm

ΔR
x



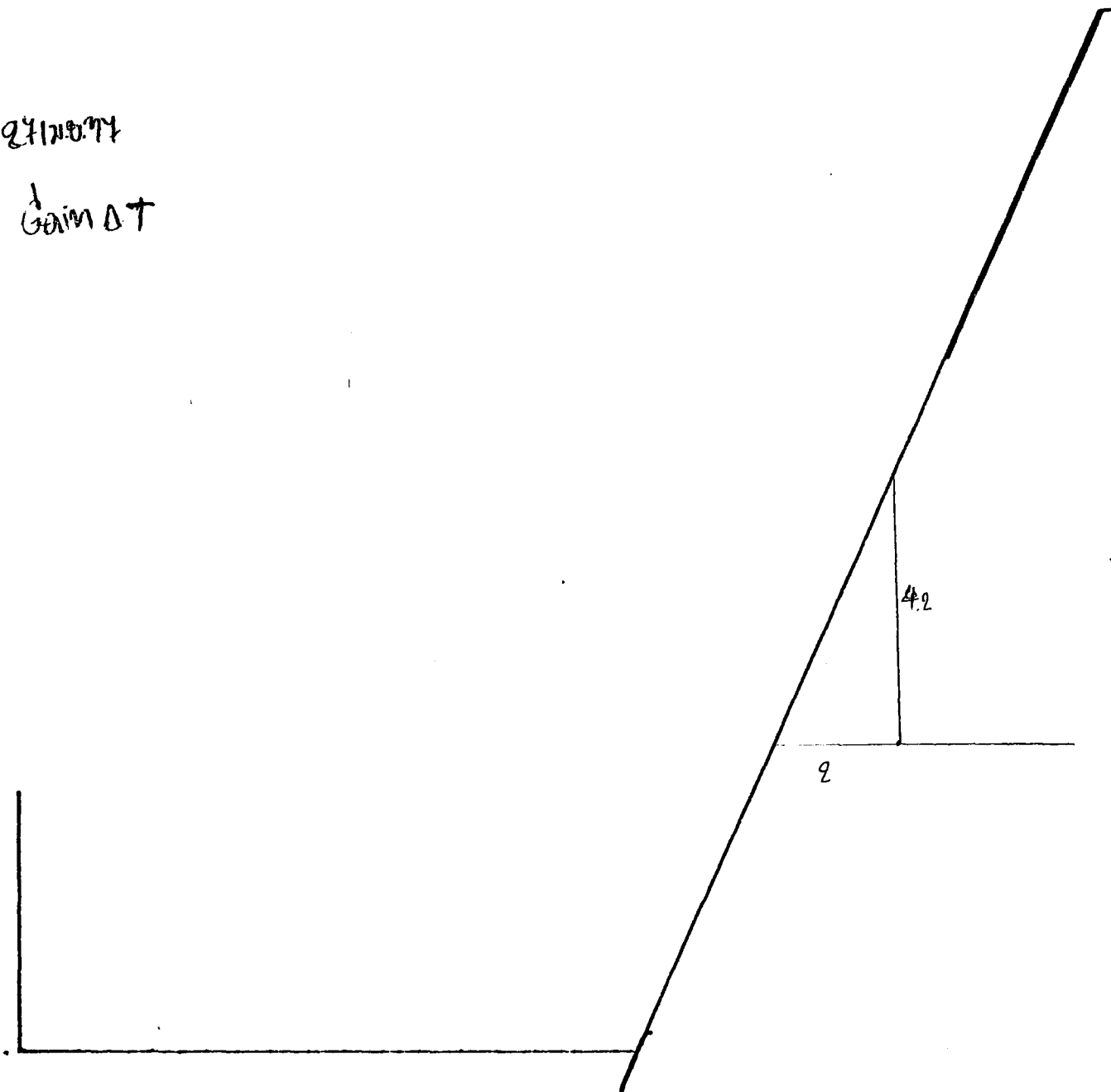
2712077

Gain ΔT

Δy
↑
→ Δx

$y: 0.25V/cm$

$x: 0.5mV/cm$



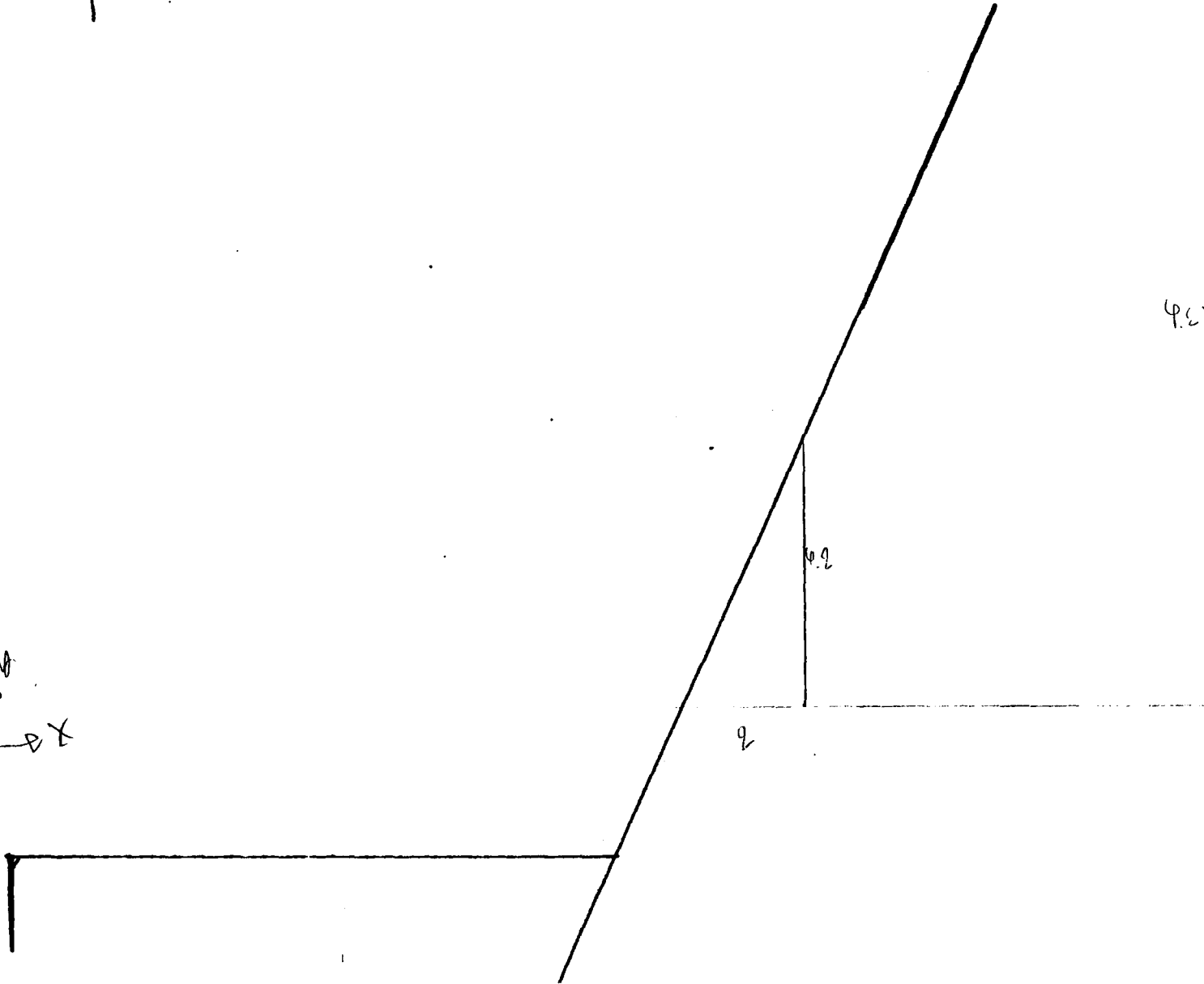
27 10/10/14

Gain. Amp. ΔT

X.05 mV/cm

4.2X

ΔT



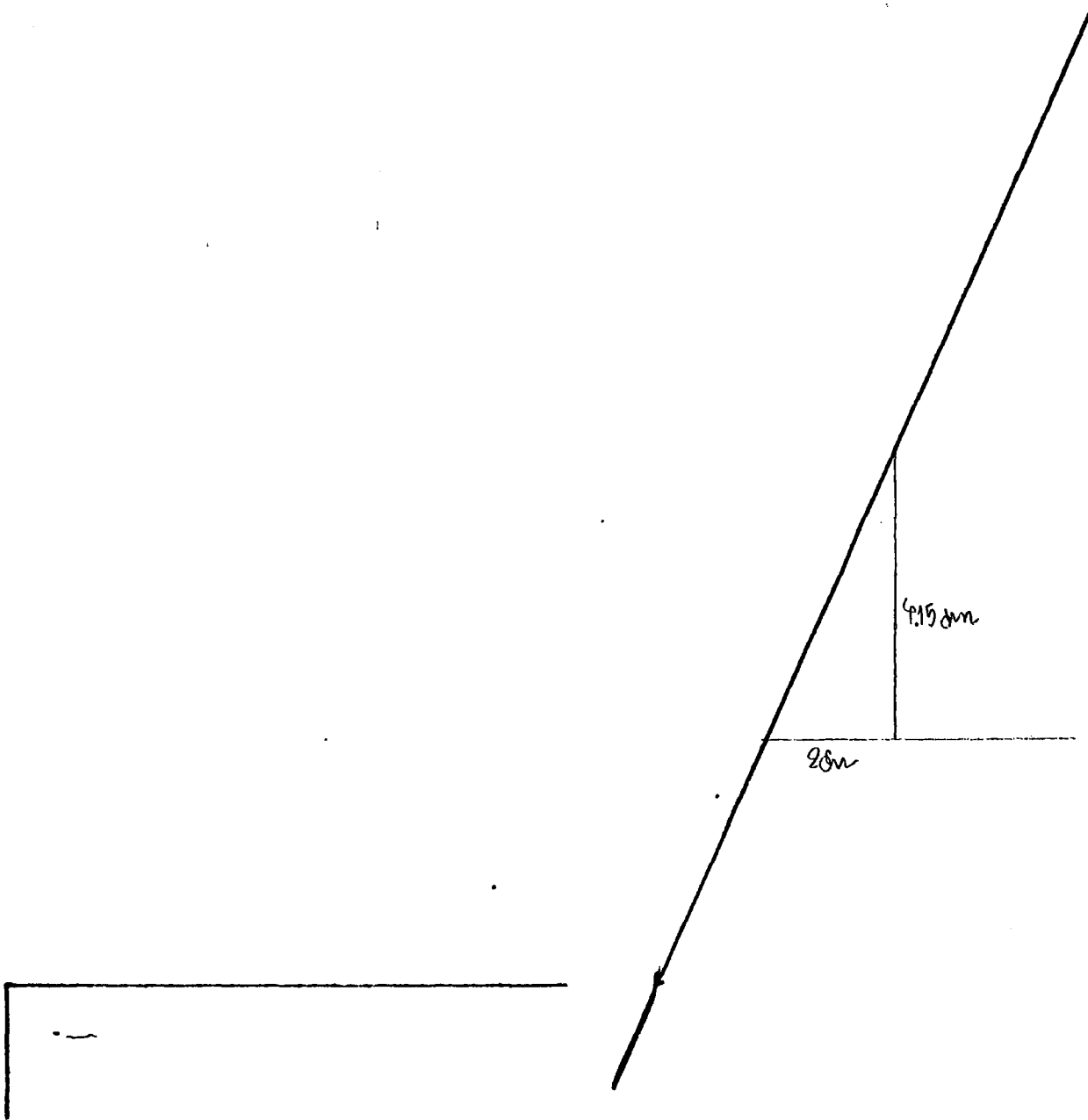
41100-17

Gain ΔT

Y: 0.25 V/cm

X: 0.5 mV/cm

Y
X



๒. ข้อมูลการทดสอบวงจรขยายแรงดันไฟฟ้าที่เบค

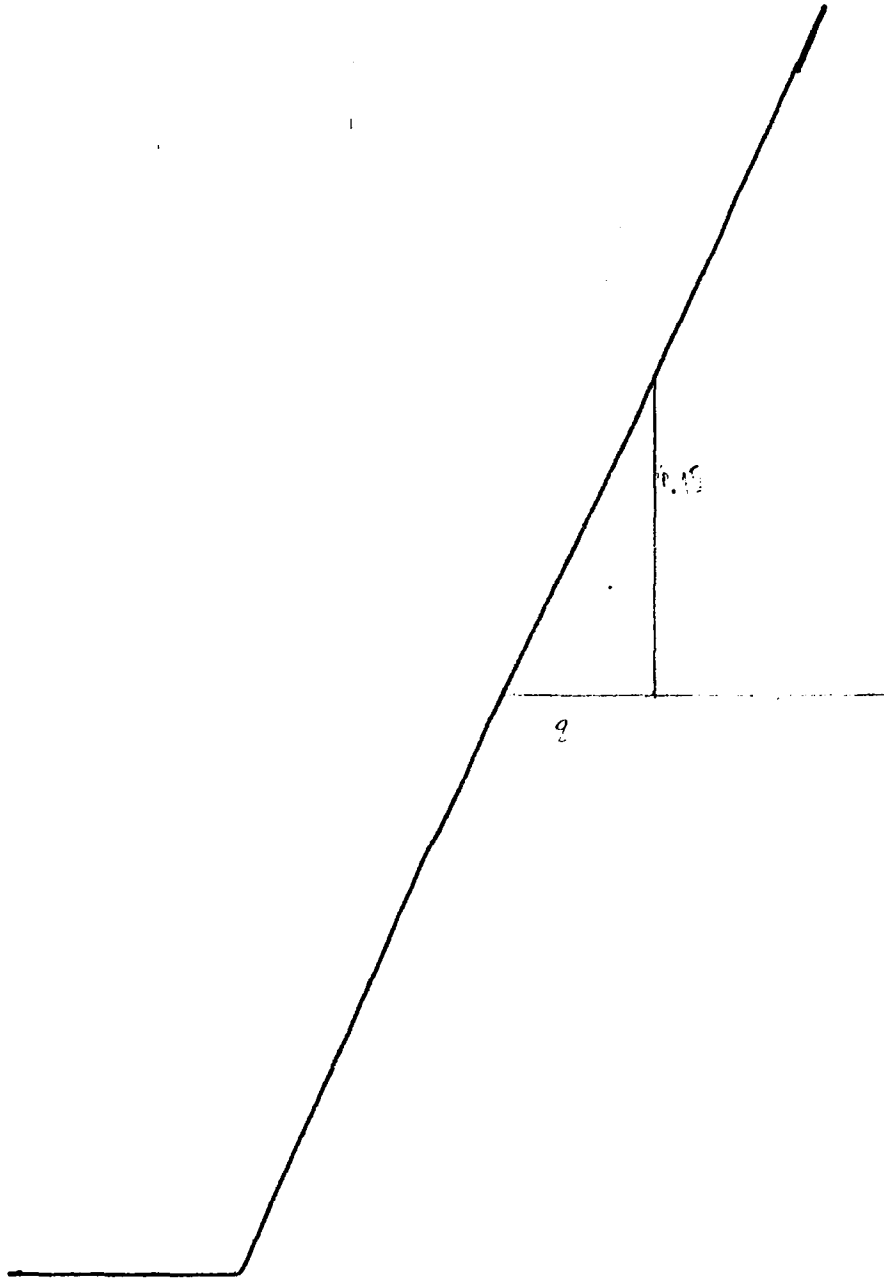
TABLE: 17

Y
OX

Gain ΔV .

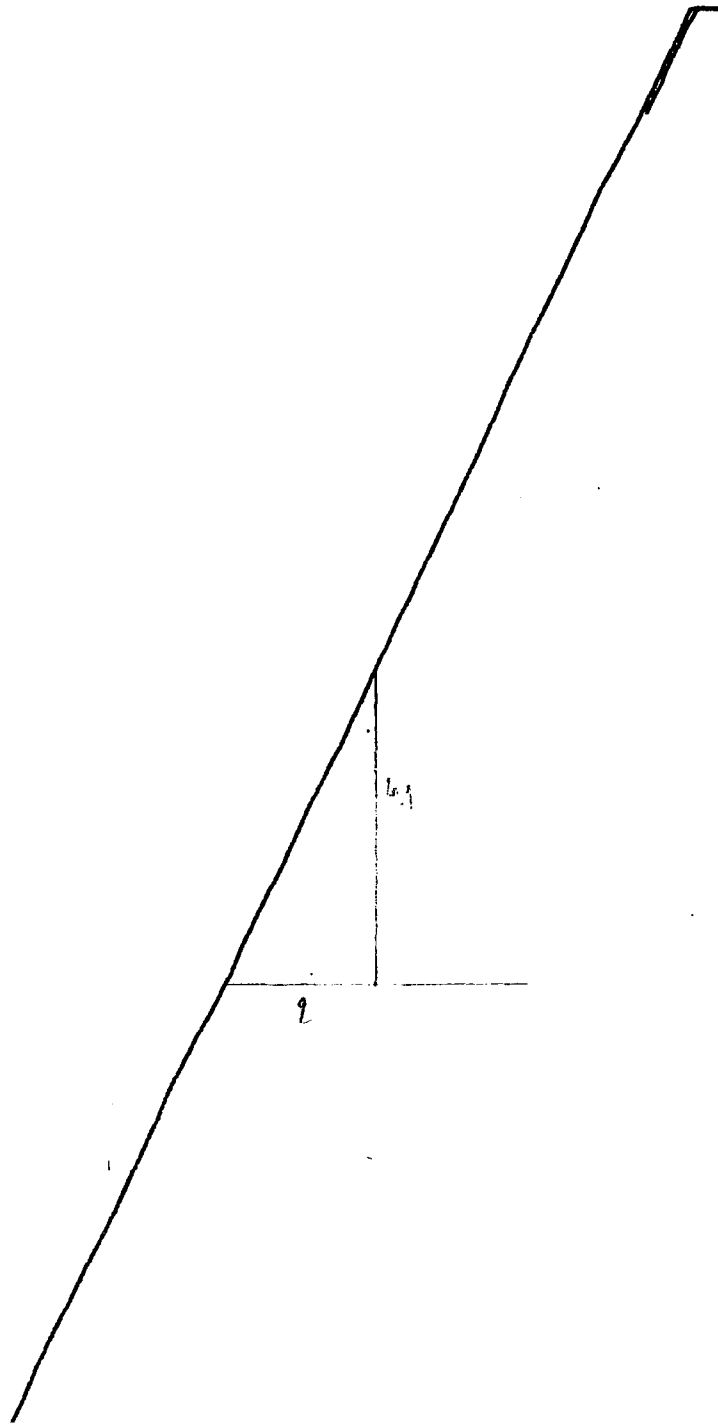
Y: 50 mV/cm

X: 0.5 mV/cm



27 Nov 97

Δy
Gain ΔV
 Δx

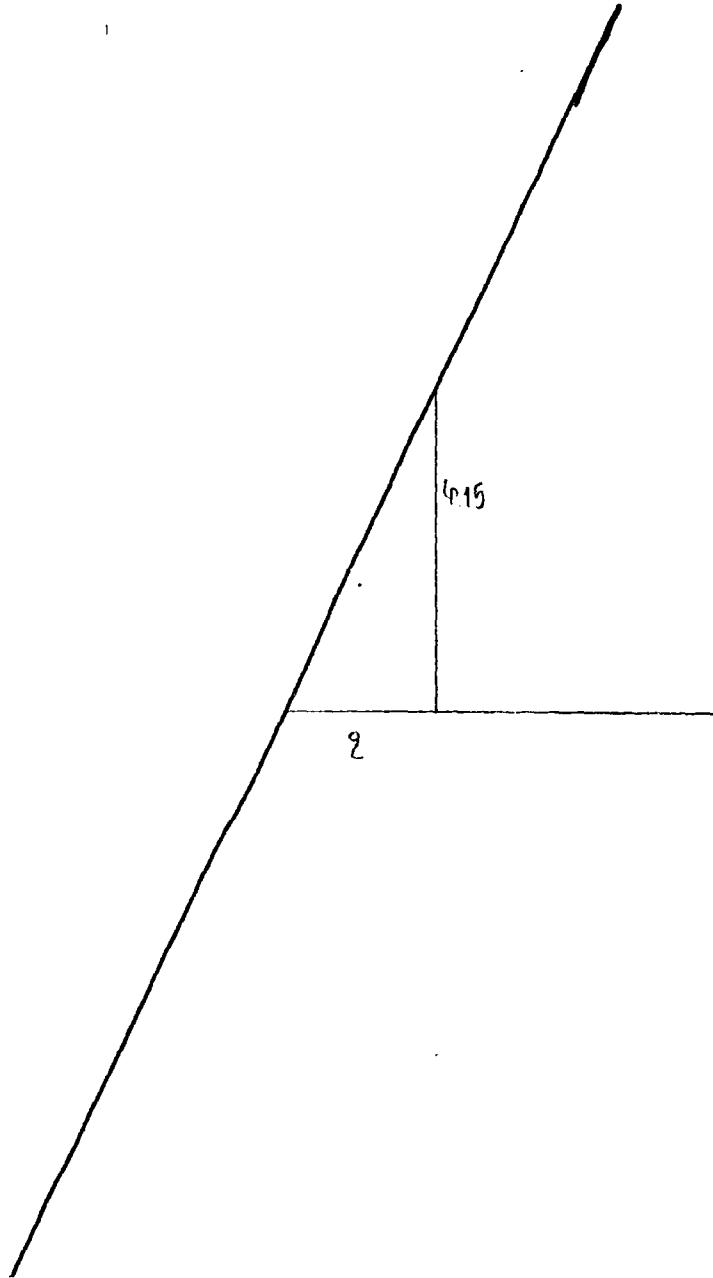


$y: 50 \text{ mV/cm}$
 $x: 0.5 \text{ mV/cm}$

07.11.2017

\vec{p}
 $\rightarrow x$

\vec{v}
 $\rightarrow y$



$y: 50 \text{ mV/cm}$

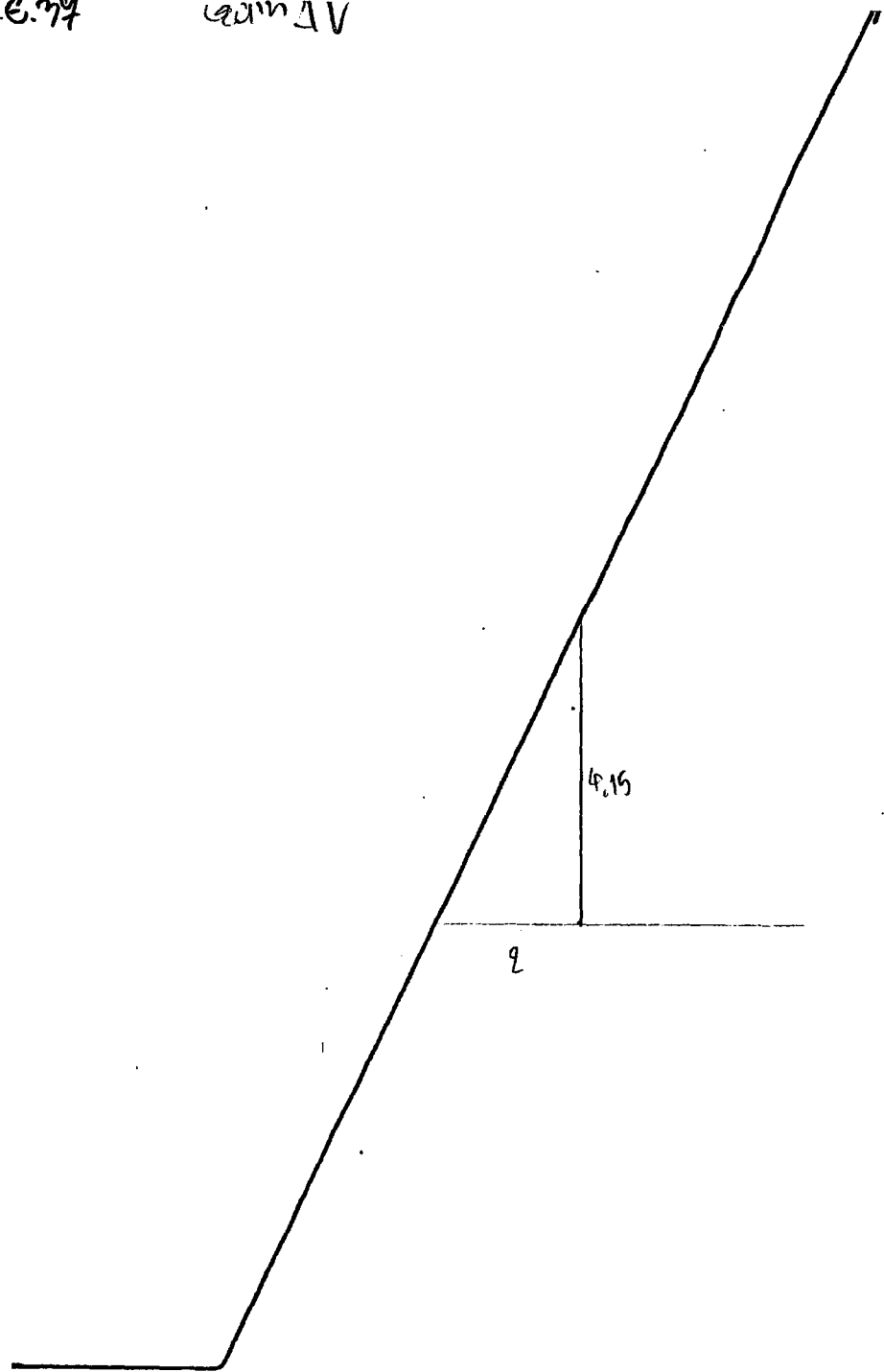
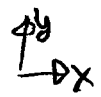
$x: 0.5 \text{ mV/cm}$

UTB.07

gain ΔV

$\theta = 50 \text{ mV/cm}$

$X = 0.5 \text{ mV/cm}$



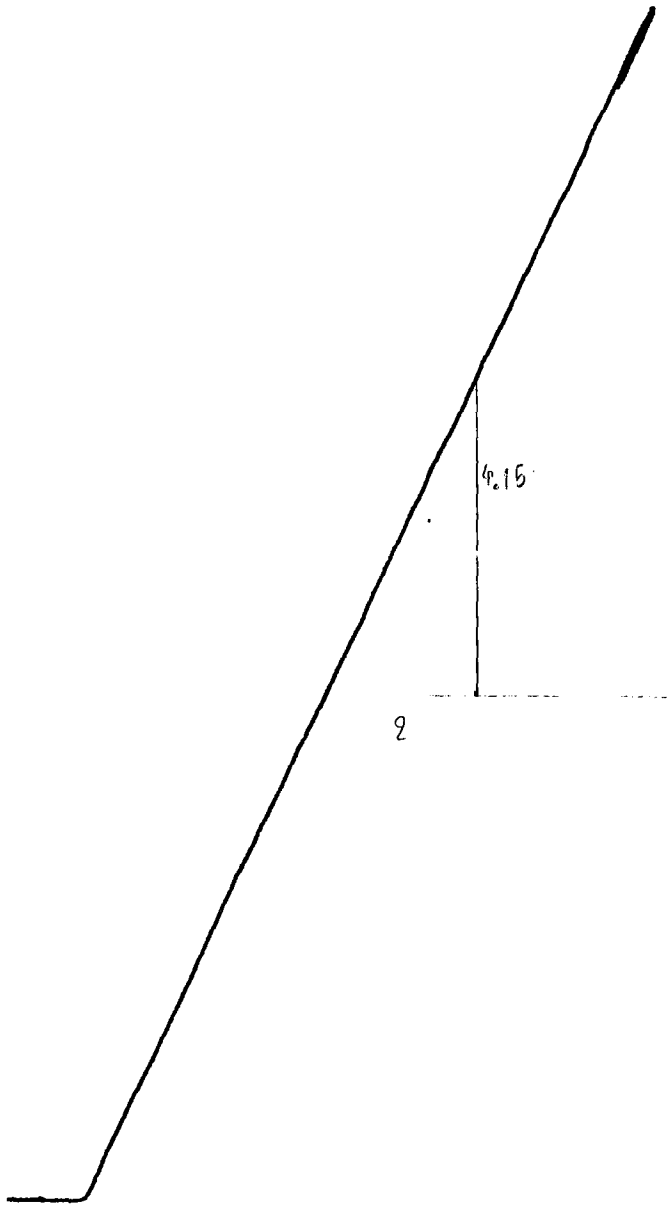
27.10.74

qy
-ex

Gain ΔV

Y: 50mV/cm

X: 0.5mV/cm



ค. ข้อมูลการทดลองวัดค่าสัมประสิทธิ์ที่เบคของสารตัวอย่าง ชนิดที่ 1 และ 2

TYPE I ИЛИ X 0.1V/cm ИЛИ Y 50mV/cm 2мкs 35°C

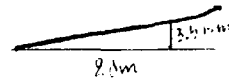
Y



7.92 8/1V²

X

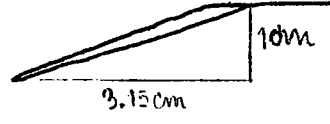
TYPE I δ_{max} 0.1V/cm δ_{min} 0.1V/cm δ_{max} 45°



X

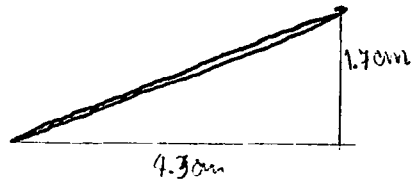
TYPE I $6.7 \times 10^{-4} \text{ V/cm}$ или 5.0 V/cm 50°C

X



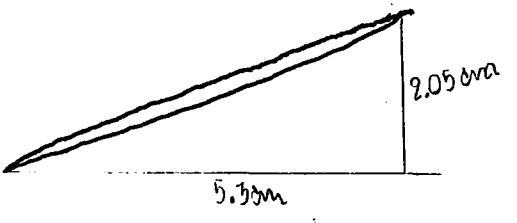
X

TYPE 1 WITH X 0.1 V/cm WITH Y 50 mV/cm @ 55°C

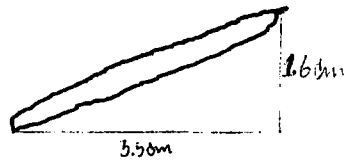


X

TYPE I $\sin \alpha \times 0.1 \text{ V/cm}$ $\sin \alpha \times 50 \text{ mV/cm}$ $\sin \alpha \times 65^\circ$

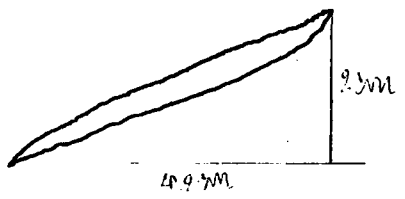


TYPE I ~~600x~~ x 0.1 V/cm ~~или~~ 50 mV/cm ~~этикетка~~ 70⁰



X

TYPE I $66 \mu\text{m} \times 0.1 \text{V}/\text{cm}$ $66 \mu\text{m} \times 50 \text{mV}/\text{cm}$ 75°C

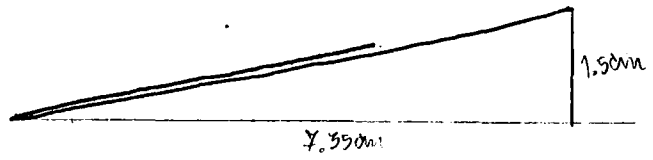


X

TYPE I ббпнх 0.1 V/cm илнх 0.1 V/cm

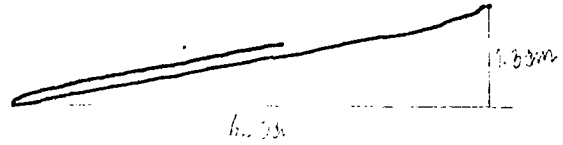
эмунд 85°C

Y



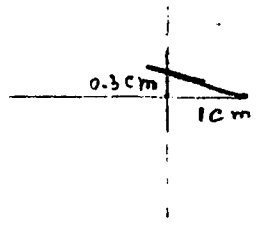
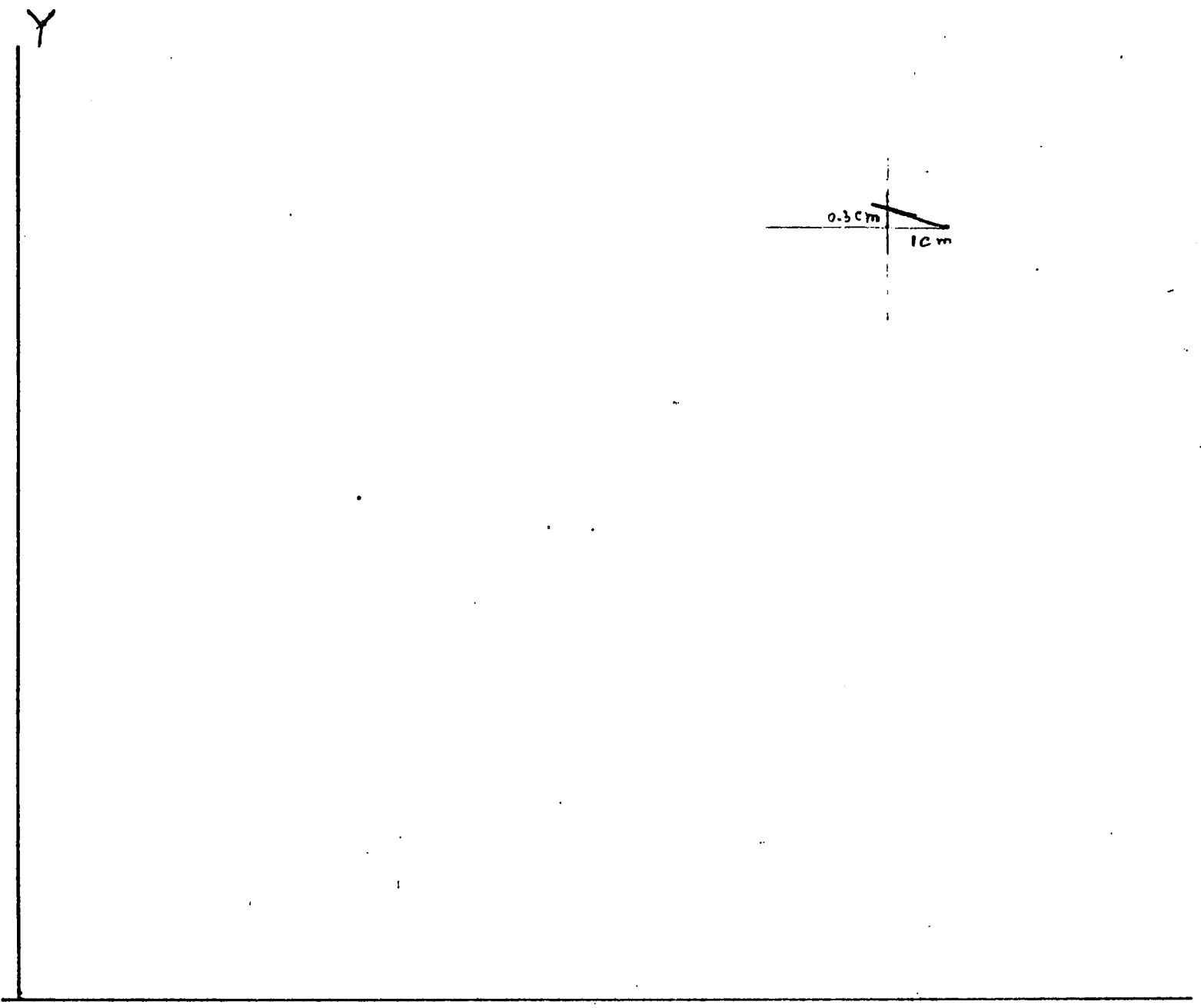
X

TYPE I БПН X 0.1 V/cm БПН Y 0.1 V/cm отклон 100%



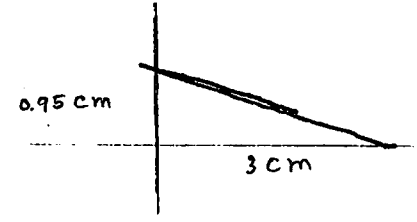
X

TYPE 2 ИЛИ 0.1V/cm ИЛИ 50mV/cm ПРИ 35°C



X

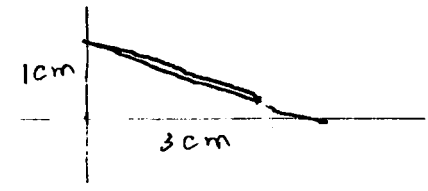
TYPE 2 $60\text{Hz} \times 0.1\text{V/cm}$ $11\text{Hz} \times 50\text{mV/cm}$ 0.1ms/div 45° Y



X

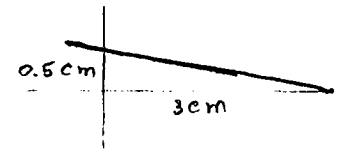
TYPE 2 $h_{11} \times 0.1 V/cm$ $h_{22} \times 50 mV/cm$ $g_{m1} \approx 50 \mu$

Y



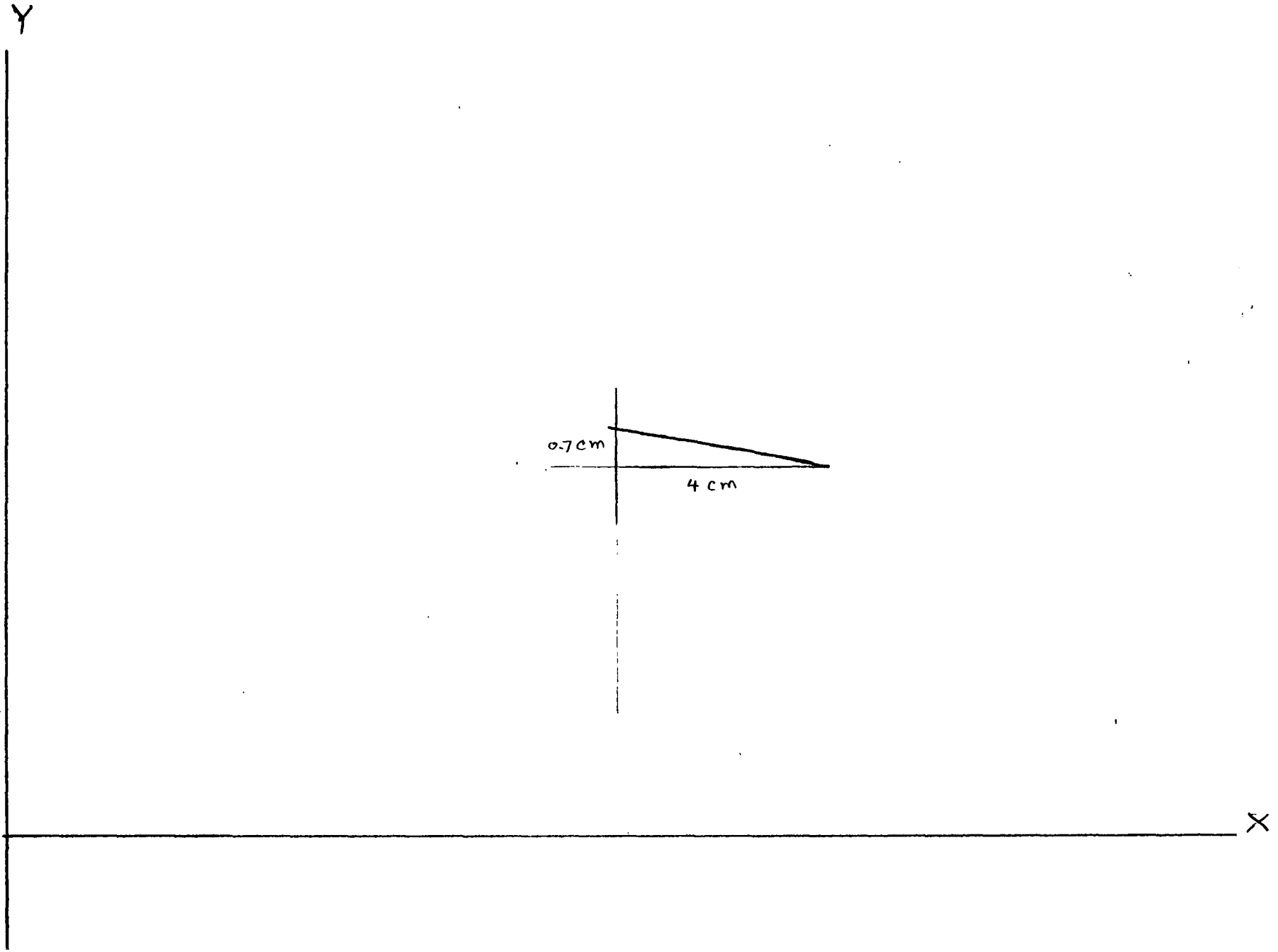
X

TYPE 2 ытхх $0.1V/cm$ ытхх $0.1V/cm$ ытхх 55°



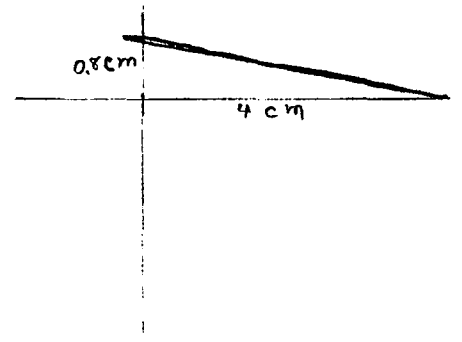
x

TYPE 2 $6\pi \times 0.1\text{V/cm}$ $6\pi \times 0.1\text{V/cm}$ $6\pi \times 0.1\text{V/cm}$ 60°



TYPE 2 БИПХ 0.1V/cm ИЛИ Y 0.1V/cm ЧЛЮД 65°C

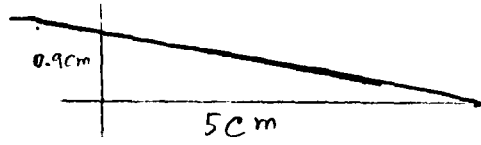
Y



X

TYPE 2 WITH X 0.1 V/cm WITH Y 0.1 V/cm PHASE 75°

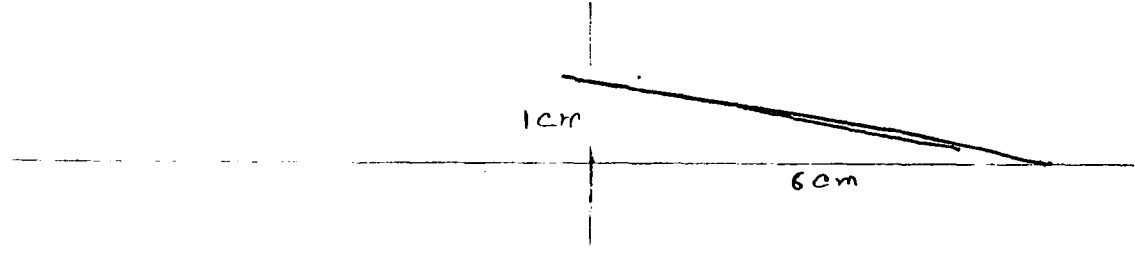
Y



X

TYPE 2 66000 x 0.1 V/cm ; 1000 Y 0.1 V/cm ; 20000 80°C

Y



X

TYPE 2 ббпк x 0.1 V/cm 117x γ 0.1 V/cm 20xкγδ 100 °C

Y

