

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

การศึกษาเสถียรภาพของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงที่เป็นผลจากอุณหภูมิในการทดลองนี้ มีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

1. การสร้างวงจรคงค่าแรงดันขึ้นโดยใช้อุปกรณ์ commercial grade เพื่อศึกษาสมบัติทั่วไปของแรงดันออกเทียบกับอุณหภูมิ

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ เช่น ทรานซิสเตอร์หรือไดโอด ซึ่งคุณสมบัติเหล่านั้นไม่สามารถแก้ไขได้ ยกตัวอย่างเช่น แรงดันที่เบส และ อิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์หรือแรงดันที่รอยต่อ พี-เอ็น ของไดโอด จะมีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเท่ากับ  $-2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  (9)

2. นำวงจรรวมแรงดันคงที่ 5 โวลต์ เป็นวงจรรวมสร้างแรงดันคงที่ เบอร์ 7805 มาทดสอบหาสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิหรือแรงดันที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

3. จากการศึกษาวงจรคงค่าแรงดันที่ประกอบเป็นเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงชนิด closed loop regulator ที่ประกอบด้วย หน่วยสร้างแรงดันอ้างอิง อุปกรณ์ตรวจจับแรงดันออก ส่วนควบคุมความคลาดเคลื่อนและอุปกรณ์ส่งผ่านหรืออุปกรณ์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นตัวควบคุมแรงดันออก ส่วนที่มีผลมากที่สุดต่อการทำให้เสถียรภาพทางอุณหภูมิของวงจรคงค่าแรงดันเปลี่ยนไป คือวงจรสร้างแรงดันอ้างอิง (Voltage reference sources) การทดลองต่อไปคือการสร้างหรือหาวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงมาทดสอบ ด้วยการทำให้มีอุณหภูมิแวดล้อม (ambient temperature) สูงขึ้น และหาคุณสมบัติค่าเสถียรภาพทางอุณหภูมิของหน่วยสร้างแรงดันอ้างอิงเหล่านั้น แล้วพิจารณาเลือกใช้วงจรที่ดีและสะดวกในการสร้าง

ฉะนั้นการทดลองส่วนใหญ่คือการทดลองสร้างแรงดันอ้างอิงที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ

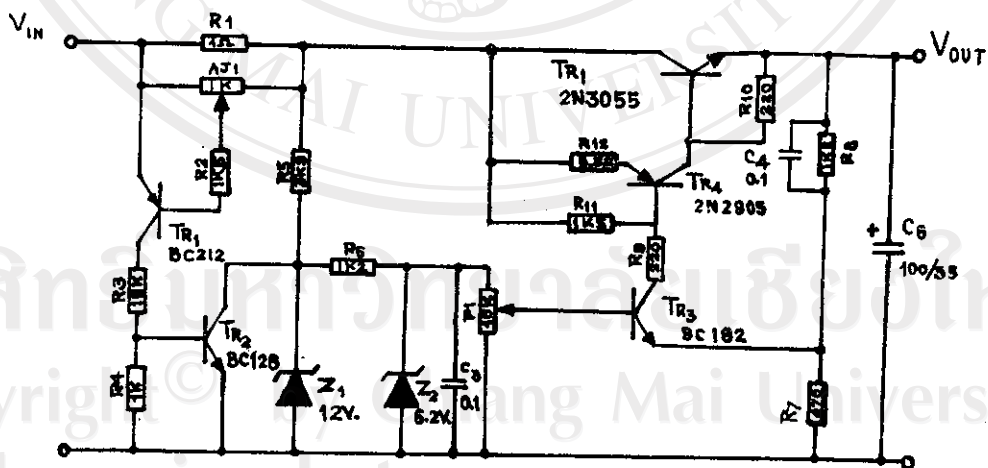
4. การทดสอบเสถียรภาพของวงจรสมมูล ที่ออกแบบไว้สำหรับจ่ายแรงดันสูงสุด 50 โวลต์ กระแสสูงสุด 2 แอมแปร์

5. การทดลองคำนวณการตอบสนองของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรง ซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน มีดังต่อไปนี้

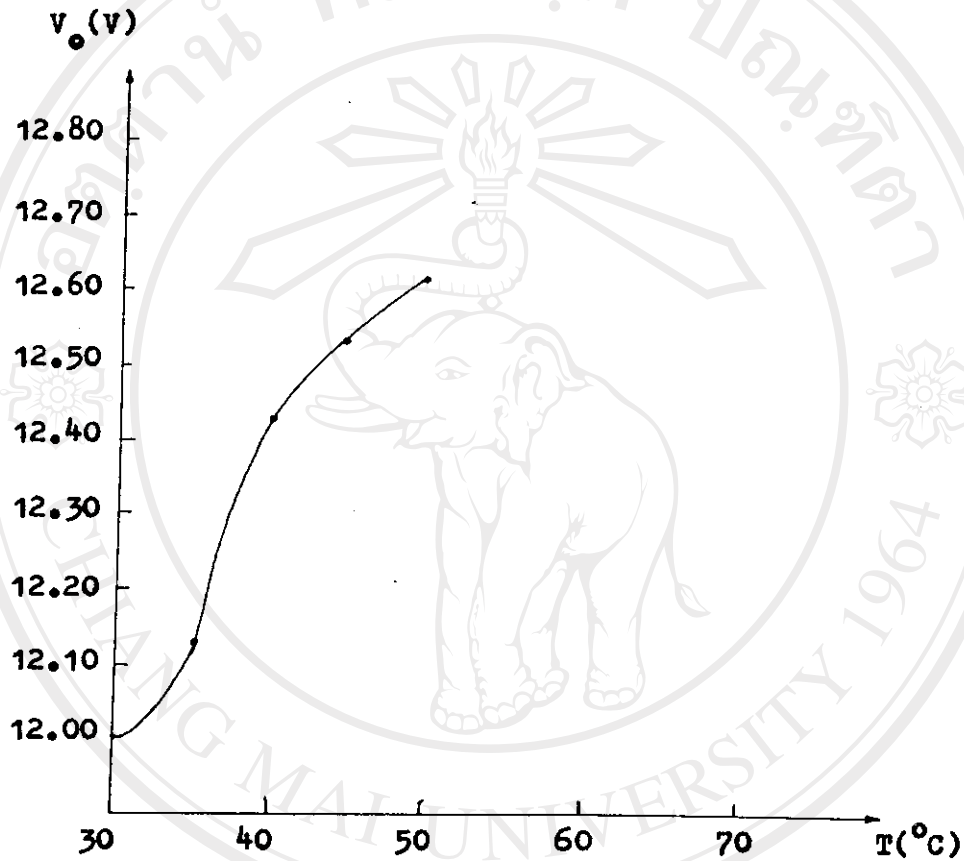
ผลการทดลอง

4.1 การทดลองสร้างวงจรคงค่าแรงดันขึ้นสำหรับหาผลของแรงดันออกต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

จากการสร้างวงจรคงค่าแรงดันขึ้นนี้ใช้ทรานซิสเตอร์ในวงจรเปรียบเทียบและใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นแรงดันอ้างอิง โดยซีเนอร์ไดโอดเหล่านั้นใช้ซีเนอร์ไดโอดที่ไม่ได้คัดเลือกจากจำนวนไดโอดชนิดซีเนอร์ที่ใช้ทดสอบค่าของซีเนอร์ไดโอดใช้ค่า  $D_{Z1} = 12$  โวลต์ และ  $D_{Z2} = 6.2$  โวลต์ ดังวงจรในรูปที่ 4.1

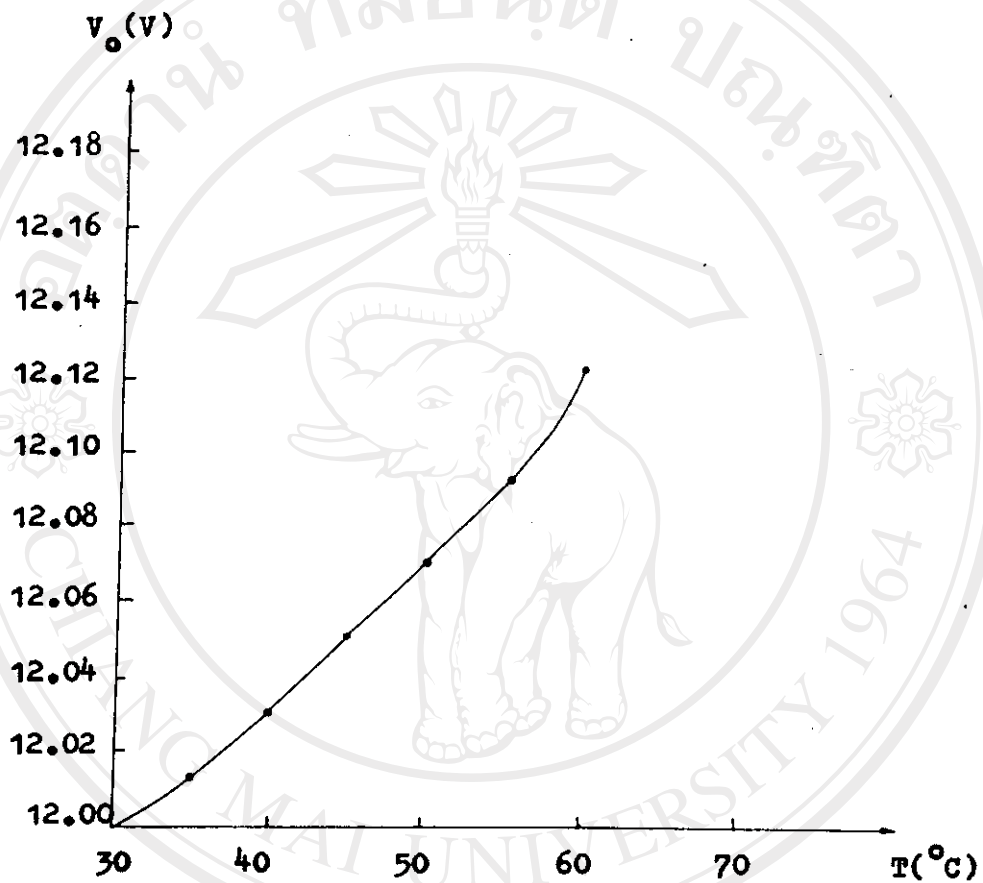


รูปที่ 4.1 รูปวงจรคงค่าแรงดันขึ้นใช้ทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้นหาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันออก เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น



T (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
V <sub>o</sub> (V)	12.00	12.12	12.41	12.52	12.60	-	-	-	-

รูปที่ 4.2 ผลการทดลองวัด  $V_o$  ของวงจรคงค่าแรงดันชนิดใช้ทรานซิสเตอร์ที่สร้างขึ้น  
 สำหรับแรงดันออกกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ใช้ zener diode 6.2 V เป็น  
 แรงดันอ้างอิง ให้ผลเปลี่ยนแปลง  $\Delta V_o = \frac{600 \text{ mV}}{50^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}} = 30 \text{ mV}/^\circ\text{C}$



Temp. (°C)	30	35	40	45	50	55	60
V <sub>o</sub> (V)	12.00	12.01	12.03	12.05	12.07	12.09	12.12

รูปที่ 4.3 ผลการทดลองวัด  $V_o$  ของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงชนิดคงค่าแรงดันและกระแสใช้วงจรรวม 7805 เป็นแรงดันอ้างอิง สร้างตามวงจรของ ผศ.ดร.บรรจบ ชตสมบัติ  $\Delta V_o = \frac{120 \text{ mV}}{30^\circ\text{C}} = 4 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

ผลการทดลอง เมื่อตั้งค่าแรงดันออกไว้ที่ 12.00 โวลต์ ขณะอุณหภูมิ 30°ซ แล้ว นำเข้าตู้อบให้อุณหภูมิสูงขึ้น แล้ววัดแรงดันออกที่เปลี่ยนไป สรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันออกสูงขึ้นจาก 12.00 โวลต์ ที่ 30°ซ ไปเป็น 12.60 โวลต์ ที่ 50°ซ โดยมีการสำรวจวัดแรงดันของวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงมีผลจาก 3.18 โวลต์ที่ 30°ซ ถึง 3.23 โวลต์ที่ 70°ซ นั้นแสดงว่าแรงดันอ้างอิงมีผลต่อแรงดันออกของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรง ชนิด closed loop regulator นอกจากนั้นยังวัด  $\Delta V_o$  ของวงจรเครื่องจ่ายไฟคงค่าแรงดันและกระแสสร้างตามวงจรของ ผศ.ดร.บรรจบ ยศสมบัติ

4.2 การทดลองวัดแรงดันออกของวงจรรวมชนิดคงค่าแรงดัน 3 ขา 5.00 โวลต์เมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น

จากผลการทดลองวัด  $\Delta V_o$  ต่ออุณหภูมิของวงจรคงค่าแรงดันชนิด 3 ขา 5.00 โวลต์รวม 7805 เป็นวงจรสร้างแรงดันอ้างอิง ทำให้แรงดันออกเปลี่ยนไป จึงทำให้ทดลองวัด 7805 ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิจากการทดลองใช้ตัวอย่างวงจรรวม 7805 จำนวน 3 ตัวอย่าง มาวัดหา  $\Delta V_o$  เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากผลการทดลองหน้าถัดไป ทำให้ทราบว่า แต่ละตัวอย่างจะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิที่ต่างกันออกไป เช่น

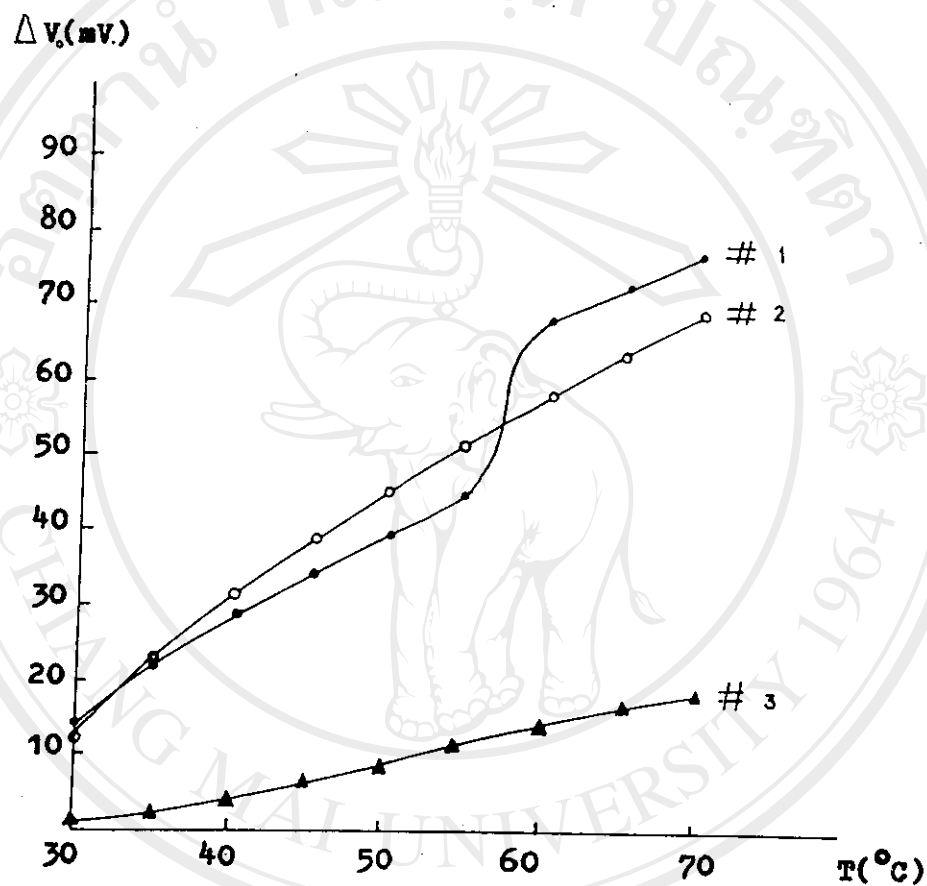
$$\text{ตัวอย่างที่ 1 มีผล } \Delta V_o = \frac{61.2 \text{ mV}}{40^\circ\text{C}} \approx 1.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

$$\text{ตัวอย่างที่ 2 มีผล } \Delta V_o = \frac{56 \text{ mV}}{40^\circ\text{C}} \approx 1.4 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

$$\text{ตัวอย่างที่ 3 มีผล } \Delta V_o = \frac{17.7 \text{ mV}}{40} \approx 0.44 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

ในการวัดเปรียบเทียบจากแรงดันอ้างอิงจากวงจรรวม LM 336 ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรอบคาน เป็นตัวเปรียบเทียบ

จากผลการทดลองหน้าถัดไป ทำให้ทราบว่าแต่ละตัวอย่างของ IC 7805 จะให้สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิไม่แน่นอนแล้วแต่ละตัวอย่าง ฉะนั้นการทดลองใช้ความเที่ยงตรงค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต้องมีการทดลองและคัดเลือวงจรรวม 7805 ซึ่งเป็นวงจรรวมชนิดคงค่า



Temp. (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
#1 $\Delta V_0$ (mV)	14.0	21.5	28.4	33.5	39.2	43.9	68.2	70.1	75.0
#2 $\Delta V_0$ (mV)	12.4	22.7	31.1	38.5	44.6	50.3	57.7	62.3	68.0
#3 $\Delta V_0$ (mV)	0.2	1.9	4.2	6.4	8.6	11.2	13.4	15.7	17.9

รูปที่ 4.4 ผลการทดลองวัด  $\Delta V_0$  ของวงจรรวมเบอร์ 7805 จำนวน 3 ตัวอย่างโดย  
การวัดเปรียบเทียบกับวงจรสร้างแรงดันอ้างอิง LM 336 ,  $\Delta V_0$  ของ  
7805 ที่ใส่ทุกใน 3 ตัวอย่างคือ  $0.44 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

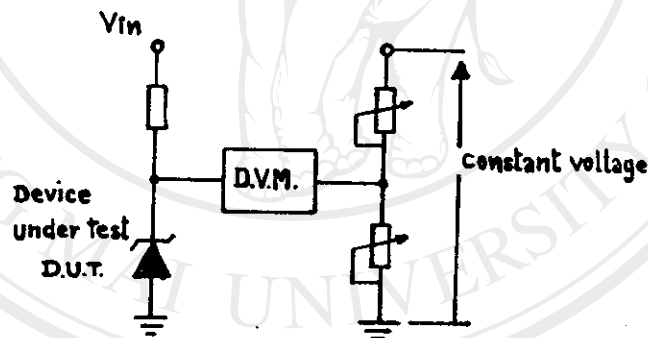
แรงดัน 3 ขา โดยใช้ตัวอย่างที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิค่า ไปใช้งาน

#### 4.3 การทดลองสร้างแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิง

ประกอบด้วยการทดลองต่อไปนี้

##### 4.3.1 การทดลองสร้างแรงดันอ้างอิงด้วยซีเนอร์ไดโอด

เมื่อใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นแรงดันอ้างอิง แล้ววัดสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดที่ค่าแรงดันเบรกวัดต่าง ๆ ในการทดลองนี้ นำซีเนอร์ไดโอดค่าต่าง ๆ มาทดลองวัดแรงดันเบรกวัดที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำซีเนอร์ไดโอดเข้าตู้อบ แล้ววัดแรงดันที่เปลี่ยนไปเป็น  $\Delta V_0$  โดยเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟคงที่ภายนอก ด้วยการวัดเปรียบเทียบ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การวัดคุณสมบัติทางสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของซีเนอร์ไดโอดหา  $\Delta V_0$  โดยการวัดว่ามีการเปลี่ยนแปลง  $V_0$  เท่าไรในหน่วยมิลลิโวลต์

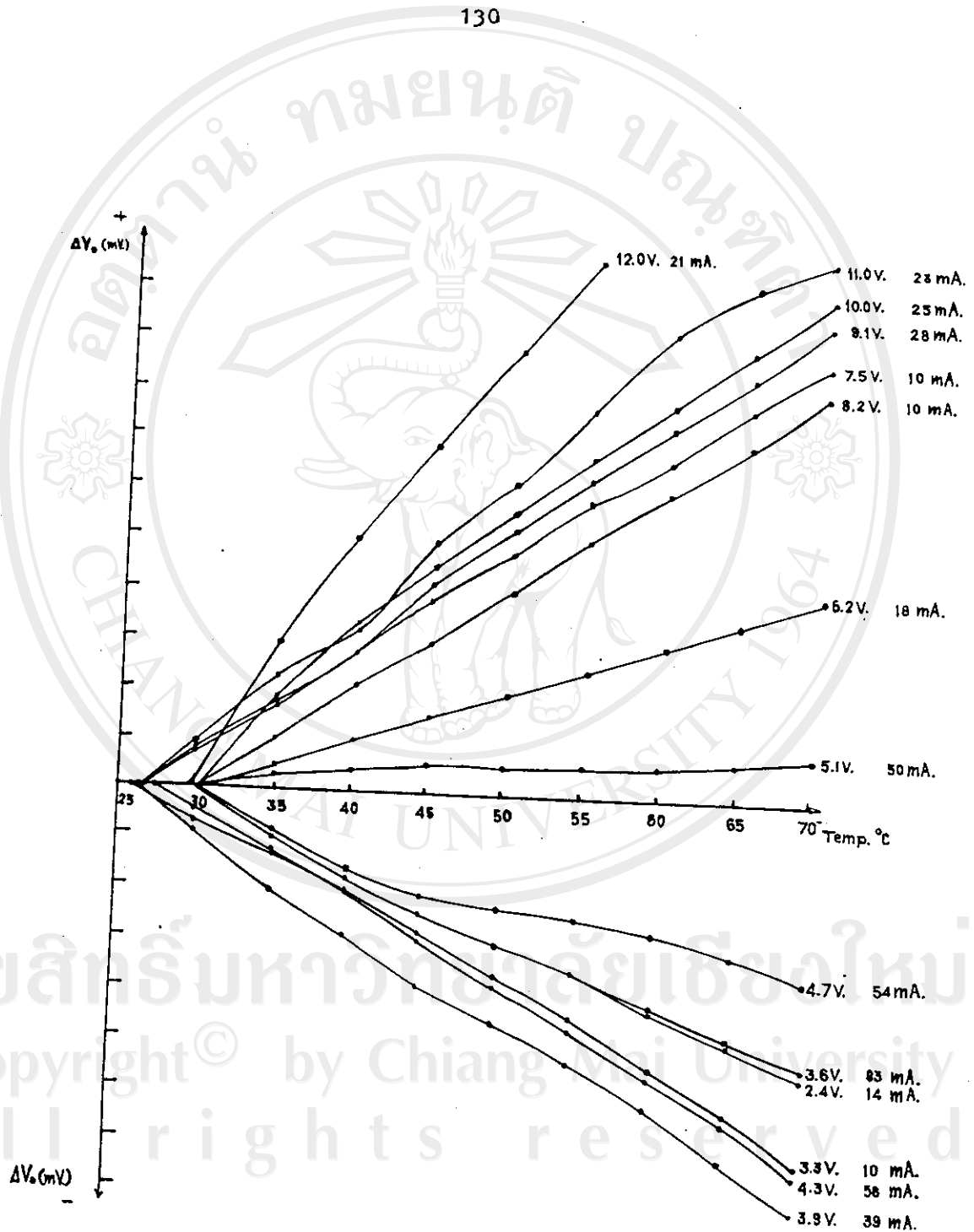
ผลการทดลองวัด คุณสมบัติทางอุณหภูมิของแรงดันเบรกวัดต่าง ๆ ของซีเนอร์ไดโอด แสดงกราฟ เป็นสมมติของซีเนอร์ไดโอดที่เป็น Selected device ที่คัดเลือกตัวที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำที่สุดที่แตกต่างกันไม่มากกว่า  $\pm 1$  มิลลิโวลต์ ในจำนวนประมาณ 4-5 ตัวที่ทดลอง



ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงคุณสมบัติทางอุณหภูมิของซีเนอร์โคไซด์ต่าง ๆ แสดงค่า  $\Delta V_0$  ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในหน่วยมิลลิโวลต์

Temp (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70	
Vz (V.)										
2.4	0	10	16	24	30	35	42	48	54	Negative Temp.Co.
3.3	0	13	20	30	38	46	54	63	73	
3.6	0	9	16	24	30	35	43	47	53	
3.9	9	20	28	39	46	54	62	72	82	
4.3	8	14	20	29	37	46	55	65	75	
4.7	5	10	14	20	21	25	27	31	36	
5.1	4	6	9	11	12	14	15	16	18	Positive Temp.Co.
6.2	2	8	20	30	40	51	60	70	81	
7.5	16	38	56	75	98	118	136	155	175	
8.2	0	20	41	60	80	101	122	142	163	
9.1	14	33	55	82	107	126	148	169	190	
10.0	16	46	61	91	111	135	158	181	202	
11.0	0	39	69	101	125	155	186	207	218	
12.0	4	59	102	140	179	214	-	-	-	





รูปที่ 4.6 ผลการทดลองของซีเนอร์โคโคค แสดงคุณสมบัติรวมของซีเนอร์ค่าต่าง ๆ คำนบนมีสัมพันธ์อุณหภูมิเป็นบวก ค่านล่างแสดงสัมพันธ์อุณหภูมิเป็นลบ

จากผลการทดลองที่เป็นตารางและกราฟ จะเห็นว่าซีเนอร์ไดโอดที่มีค่าแรงดันเบรคควานมากกว่า 4.7 โวลต์ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นบวก (Positive temperature coefficient) และแรงดันเบรคควานที่เท่ากับหรือน้อยกว่า 4.7 โวลต์ จะมีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นลบ (Negative temperature coefficient)

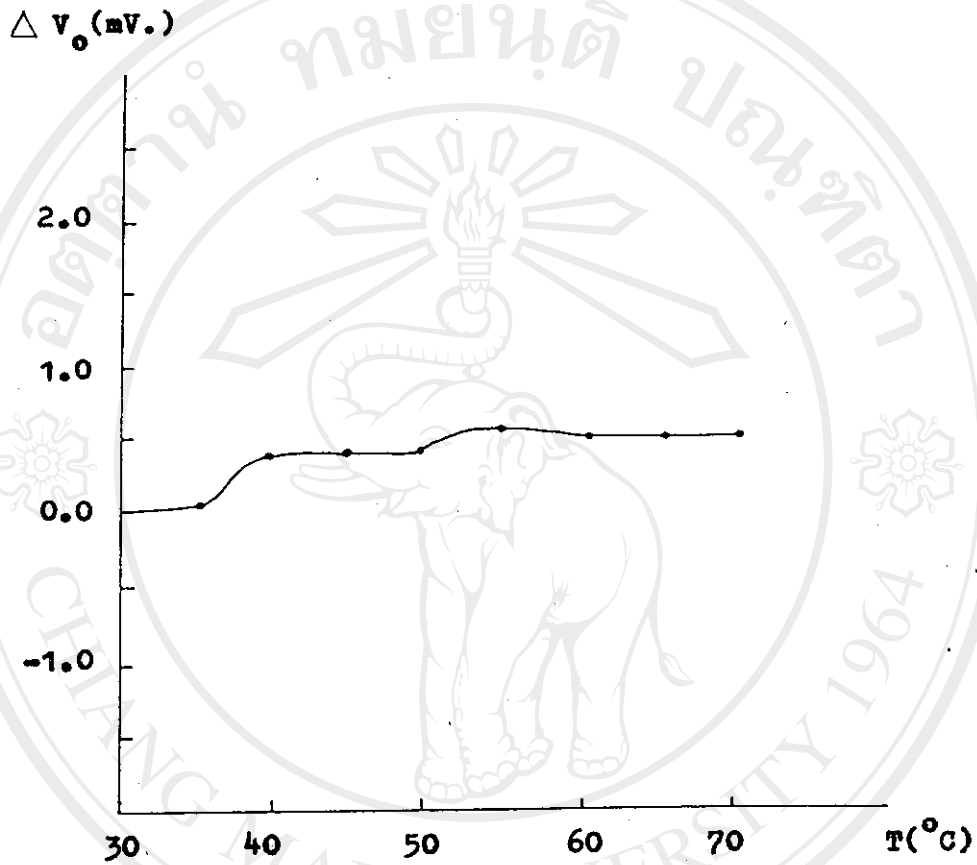
จากการอบซีเนอร์ไดโอดในตู้อบจากอุณหภูมิ  $30^{\circ}\text{C}$  ถึง  $70^{\circ}\text{C}$  นั้นซีเนอร์ไดโอดขนาด 2.4 โวลต์ ถึง 4.7 โวลต์มีการแปรเปลี่ยนไปของแรงดันที่ออกมาประมาณ  $-30$  ถึง  $-80$  มิลลิโวลต์ และซีเนอร์ไดโอดขนาด 6.2 โวลต์ถึง 12 โวลต์มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็น  $+80$  ถึง  $+200$  มิลลิโวลต์ แสดงให้เห็นว่าซีเนอร์ไดโอดเหล่านี้มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิที่ไม่นิ่ง นอกจากใช้ซีเนอร์ขนาด 5.1 โวลต์ หรือ 4.7 โวลต์ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ

ซีเนอร์ไดโอดที่น่าสนใจคือค่า 5.1 โวลต์ จะมี  $\Delta V_z$  สูงสุดประมาณ 20 มิลลิโวลต์ ในช่วง  $30^{\circ}\text{C}$  ถึง  $70^{\circ}\text{C}$  แต่ตามีการป้อนกระแสให้แก่ซีเนอร์ไดโอด 5.1 โวลต์ ค่าที่พอเหมาะก็จะทำให้คุณสมบัติทางอุณหภูมิเข้าใกล้ศูนย์หรือเป็น  $\Delta V_z \approx 0.8$  ถึง 1 มิลลิโวลต์

ในการทดลองซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N5231 ซึ่งเป็นซีเนอร์ไดโอดขนาด 5.1 โวลต์ ใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ จากไฟ 12 โวลต์ ซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำมาก ดังกราฟรูปที่ 4.7

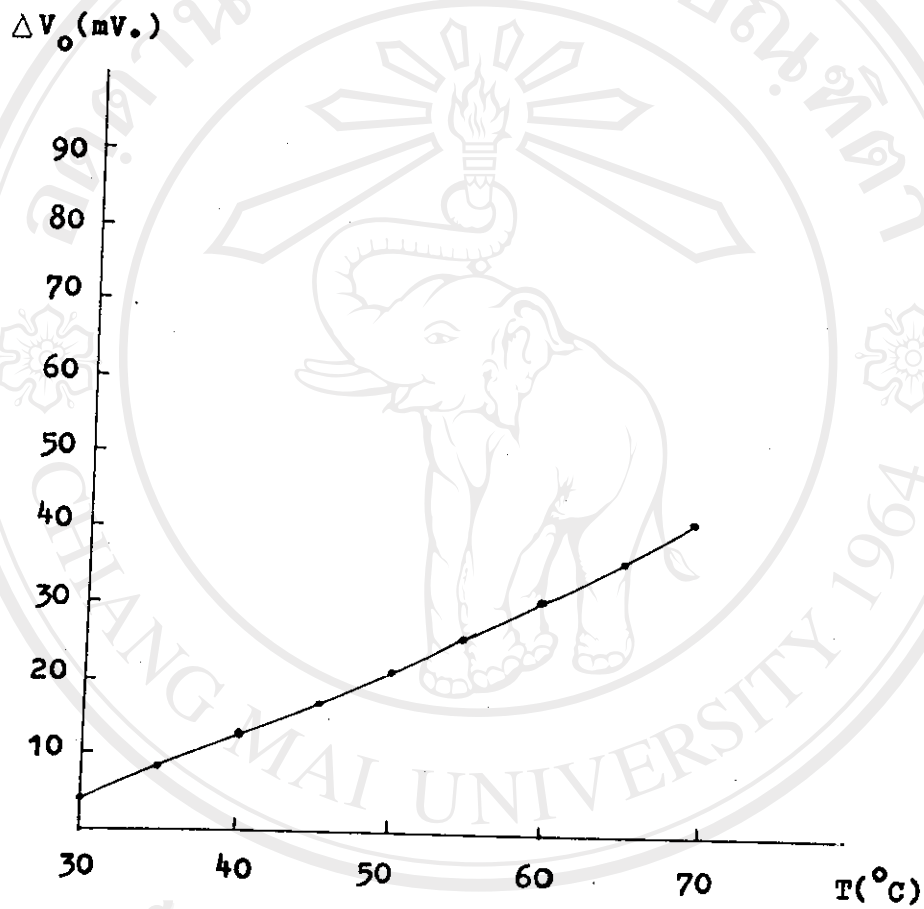
ในการใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นแรงดันอ้างอิง และการเลือกใช้ซีเนอร์ไดโอดที่มีการชดเชยอุณหภูมิด้วยการใช้ซีเนอร์ไดโอดที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นบวกเท่า ๆ กับสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่เป็นลบ ของซีเนอร์ไดโอดอีกตัวหนึ่ง แล้วนำมาต่ออนุกรมกัน เช่น 4.7 โวลต์ กับ 6.2 โวลต์ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.8

สำหรับการต่ออนุกรมกับไดโอดธรรมดา ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิประมาณ  $-2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  นั้นควรเลือกต่อกับซีเนอร์ไดโอดชนิดที่มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็น  $+2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ด้วยเพื่อตัดกันให้ได้อายุสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ



Temp. (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$\Delta V_o$ (mV.)	0.0	0.0	0.4	0.4	0.4	0.6	0.5	0.5	0.5

รูปที่ 4.7 ผลการทดลองวัด  $\Delta V_o$  ซีเนอร์ไดโอด 5.1 โวลต์ โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ กับไดโอดเบอร์ 1N5231 จะมีผลการทดลองเป็น  $\frac{+0.5\text{mV}}{40^\circ\text{C}}$  นับว่ามีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิค่ามาก

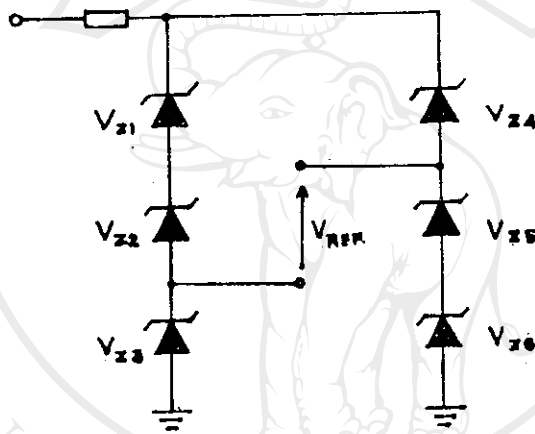


Temp. (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$\Delta V_0$ (mV.)	4.0	9.1	13.1	17.5	21.9	26	31.3	36.1	41.6

รูปที่ 4.8 ผลการทดลองนำซีเนอร์ 4.7 โวลต์ กับ 5.2 โวลต์ มาอนุกรมกัน แล้วหา  $\Delta V_0$  จากการรอบให้อุณหภูมิสูงขึ้น

4.3.2 ผลการทดลองการต่อซีเนอร์ไดโอดแบบแสตค (Stack)

จากการนำซีเนอร์ไดโอดขนาด 5.1 โวลต์ จำนวน 6 ตัว ท่อกันตั้งวงจรแล่นนำไปวางไว้ในตู้อบ โดยให้ซีเนอร์แต่ละตัวมีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากันด้วยการวางซีเนอร์ทั้ง 6 ตัวนี้ให้ชิดกันที่สุด



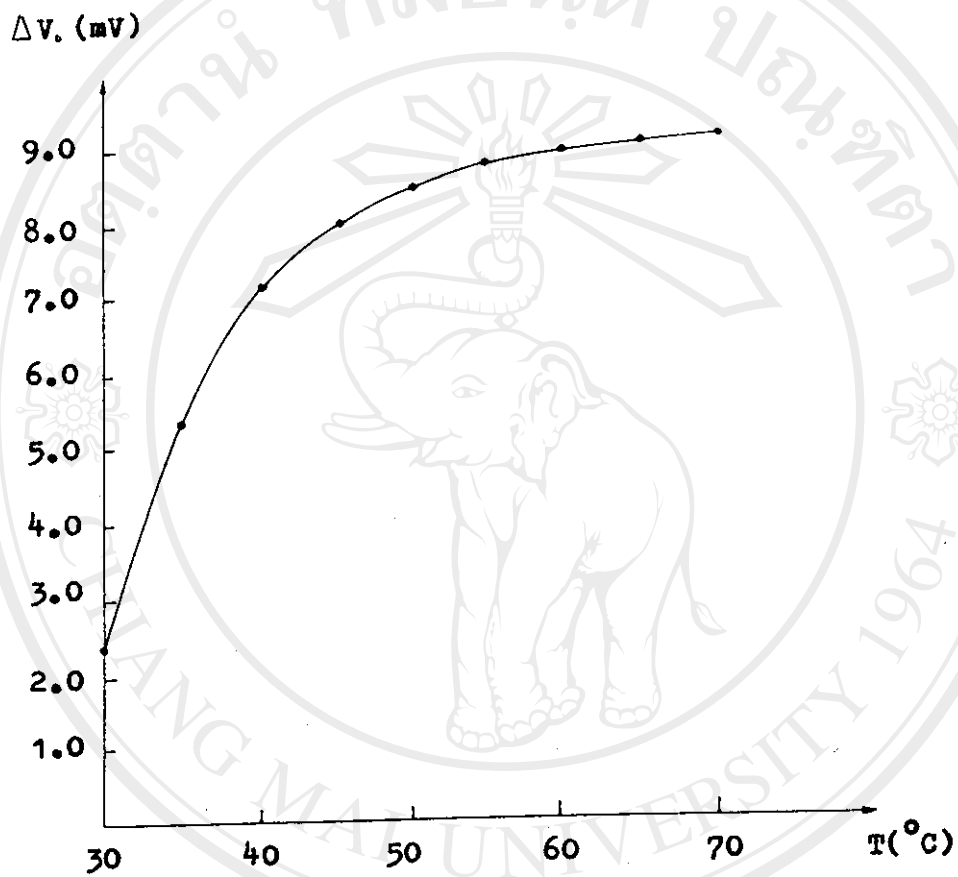
รูปที่ 4.9 วงจรการต่อซีเนอร์ไดโอดแบบ stack

จากการทดลองวัดได้แรงดันทั้งหมด 16 โวลต์

$$V_{REF} = (V_{z5} + V_{z6}) - V_{z3}$$

ผลการทดลอง ได้  $\Delta V_{REF} = \frac{6.6 \text{ mV}}{40^\circ\text{C}} \approx 0.44 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

แม้ว่าผลการทดลองที่คำนวณได้ แต่ข้อเสียอยู่ที่ไม่ทดลองกราวด์ ฉะนั้นแนวทางที่จะนำแรงดันอ้างอิงนี้ไปใช้งานควรต่อควรวางจรรยาออกนอกแพทช์ที่ เป็นบัสเฟ้อร์และอาจขยายขนาดของแรงดันอ้างอิงและทำให้ได้แรงดันอ้างอิงที่ข้างหนึ่งลงกราวด์ด้วย ค่า  $\Delta V_{REF}$  จากอุณหภูมิ  $30^\circ - 70^\circ\text{C}$  โคตา  $\approx 6.6 \text{ mV}$ .



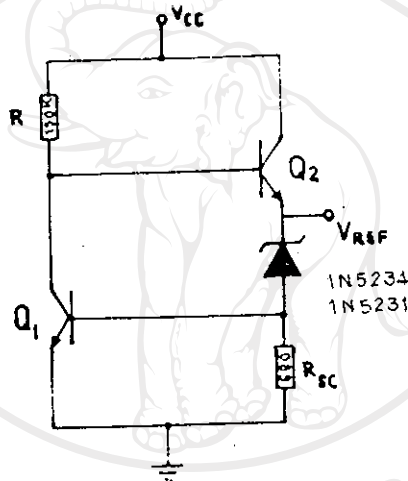
Temp. (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
ΔV. (mV)	2.3	5.2	7.0	7.9	8.3	8.6	8.8	8.9	8.9

รูปที่ 4.10 ผลการทดลองต่อซีเนอร์ไดโอดแบบ stack มีค่าแรงดันอ้างอิง 5.1

โวลต์ โห้สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็น  $0.44 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

4.3.3 การทดลองสร้างแรงดันอ้างอิงชนิดซีเนอร์ไดโอดชดเชยอุณหภูมิ  
(Temperature Compensated Zener)

จากการทดลองสร้างแรงดันอ้างอิงจากซีเนอร์ไดโอด 5.1 โวลต์ ด้วยการใช้ชดเชยอุณหภูมิ จากการจ่ายกระแสคงที่ของทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ดังวงจร



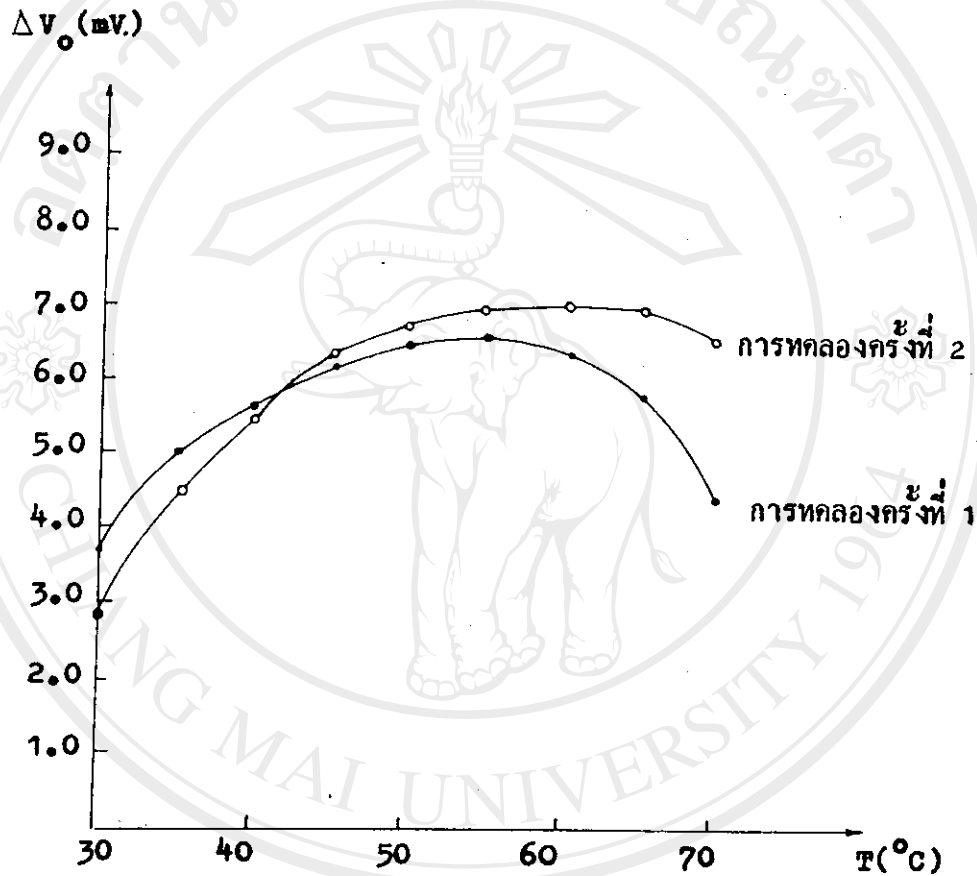
รูปที่ 4.11 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงชนิดซีเนอร์ที่ชดเชยอุณหภูมิ ด้วยการใช้กระแสคงที่จากทรานซิสเตอร์ 2 ตัว

จากผลการทดลองและกราฟแสดงให้เห็นผลที่ต่างตามสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิที่ค่า  $\Delta V_o$  ประมาณ 3-4 mV ในช่วง  $30^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$  ค่าของแรงดันที่ออกมาเท่ากับ 5.33 โวลต์ ที่กระแส 0.52 มิลลิแอมป์ คิดเป็นสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ  $4 \text{ mV}/40^{\circ}\text{C} = 0.1 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

หรือคิดเป็น  $\frac{4 \times 10^{-1}}{5.33} = 0.07\% \text{ ในช่วง } 30^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$

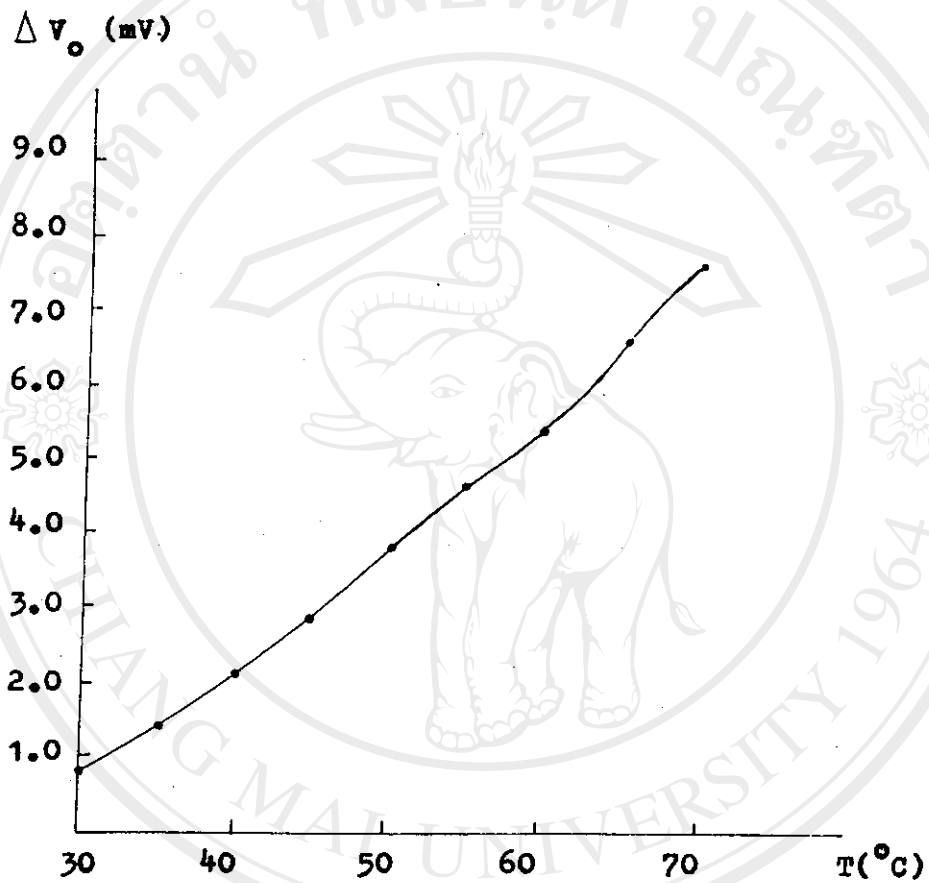
การทดลองกับวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงชนิด Temperature compensated zener นั้นถ้าใช้การเปรียบเทียบแรงดันออกมากับแรงดันอ้างอิงของ LM 336 ที่ควบคุมไม่ให้มีอุณหภูมิภายนอกเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองได้ค่า  $\Delta V_o \approx 0.17 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  ซึ่งแสดง





Temp. (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
ครั้งที่ 1 $\Delta V_0$ (V)	3.7	5.0	5.5	6.1	6.4	6.5	6.2	5.7	4.3
ครั้งที่ 2 $\Delta V_0$ (V)	2.9	4.5	5.4	6.1	6.6	6.8	6.8	6.8	6.4

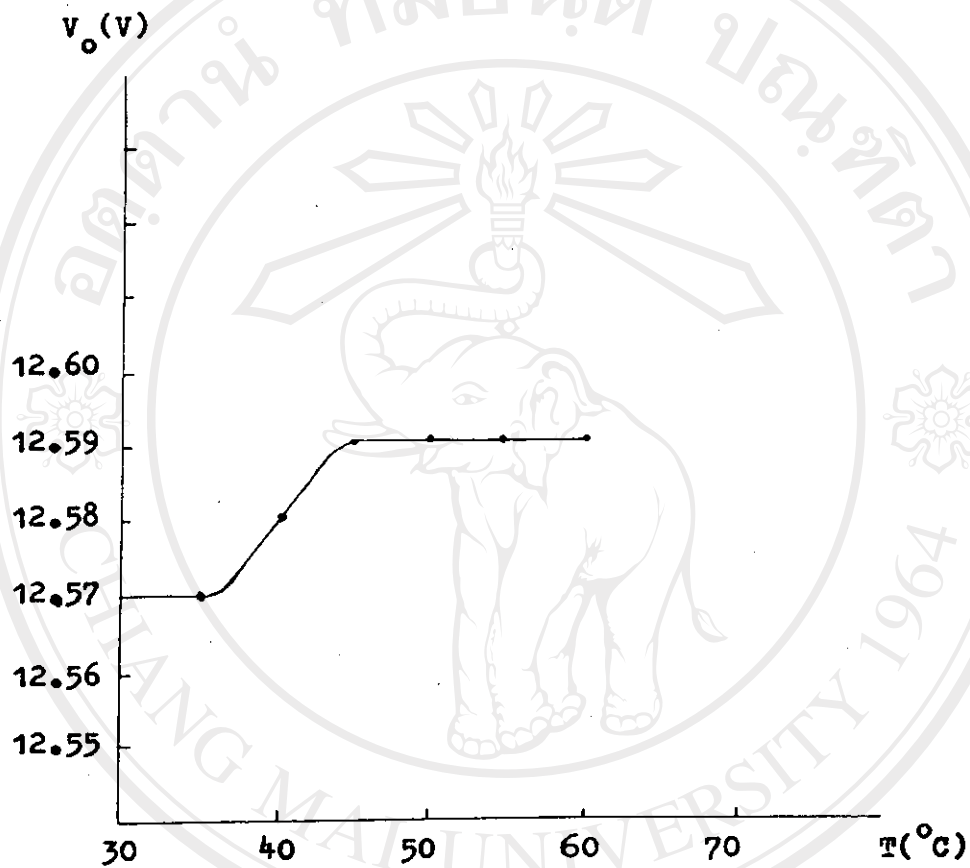
รูปที่ 4.12 ผลการทดลอง TC. zener 5.1 โวลต์ โดยการชกเซออุณหภูมิ  
 กับการจ่ายกระแสคงที่ของทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ทั้ง 2 ผลการทดลอง  
 ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิประมาณ  $0.1 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  หรือคิดเป็น  
 $0.07 \%$  ในช่วง  $30^{\circ}\text{C}$ - $70^{\circ}\text{C}$



Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$\Delta V$ (mV)	0.8	1.4	2.1	2.8	3.3	4.6	5.3	6.5	7.5

รูปที่ 4.13 ผลการทดลอง TC. zener จายกระแสคงที่เปรียบเทียบกับ IM 336

โกศา  $\Delta V_0 = 6.7 \text{ mV}/40^{\circ}\text{C} = 0.17 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$



Temp. (°C)	30	35	40	45	50	55	60
$V_o$ (V)	12.57	12.57	12.58	12.59	12.59	12.59	12.59

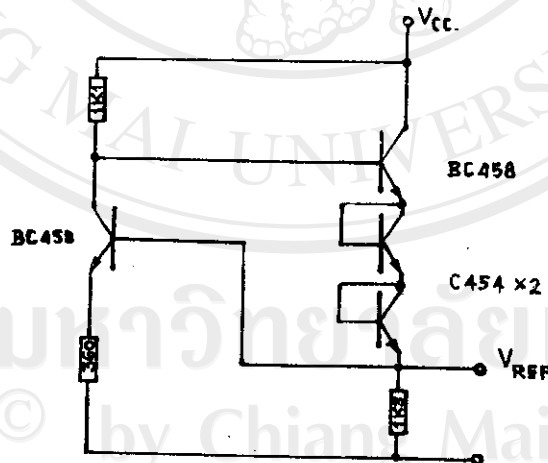
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองขยายกระแสของ TC. 5.1 โวลต์ ภาย IM 318 ให้ค่าแรงดันออก 12.57 โวลต์ มีค่า  $\Delta V_o \approx 0.66 \text{ mV/}^\circ\text{C}$

ให้เห็นว่าเป็นวงจรที่ให้สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิค่า

เนื่องจากความสามารถในการจ่ายกระแสได้น้อย ในการทดลองนำเอา TC. zener ไปใช้งานสร้างแรงดันอ้างอิง โดยการต่อกับวงจรขยายกระแสด้วยออปแอมป์ ในการทดลองใช้ LM 318 ขยายแรงดันออกมากับการใช้ทรานซิสเตอร์ขยายกระแสออกมา ให้ผลต่างของแรงดันออกประมาณ 20 mV. ในช่วง  $30^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$  คิดเป็น  $0.66 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

#### 4.3.4 ผลการทดลองวงจรแรงดันอ้างอิงของ D. HAMPEL

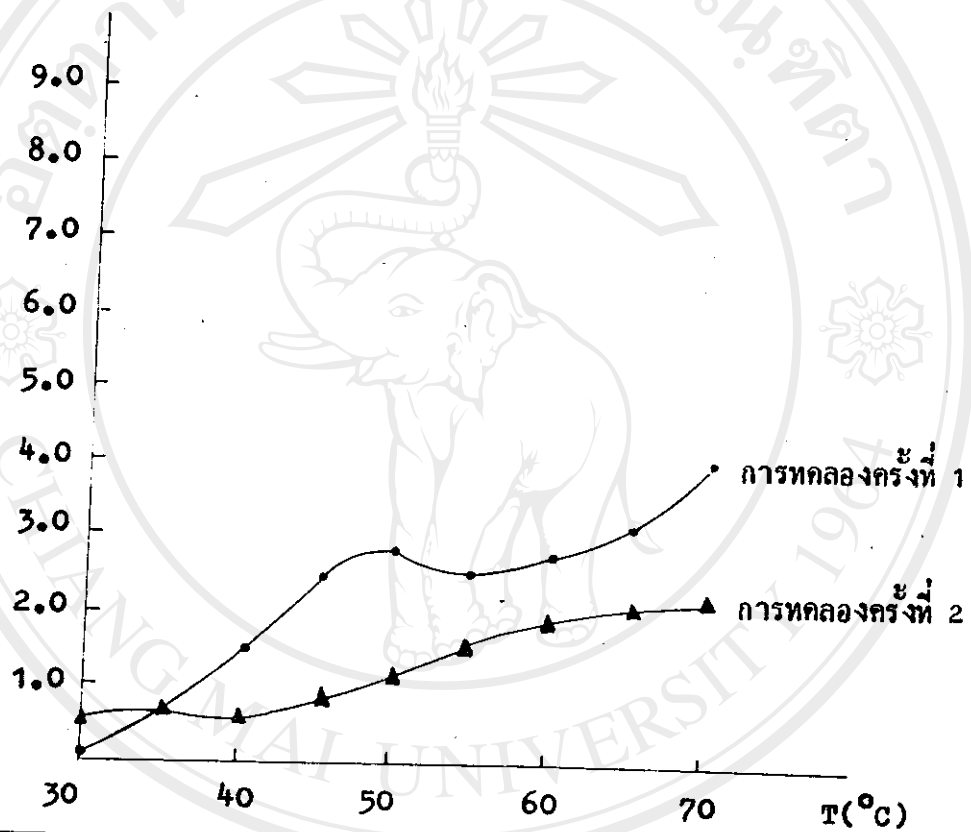
จากแรงดันอ้างอิงที่ทดสอบแล้วหาค่า  $\Delta V_0$  ที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ได้ทดลองหา  
วงจรอื่น ๆ ที่น่าสนใจและให้แรงดันอ้างอิงที่เสถียรภาพสามารถสร้างขึ้นได้ง่าย จึงทำการทดลอง  
หาคุณสมบัติของวงจรแรงดันอ้างอิงชนิดหนึ่งคือ วงจรแรงดันอ้างอิงของ D. HAMPEL มีวงจร  
ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงของ D. HAMPEL

ผลการทดลองทั้งตารางและกราฟที่วัดได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิค่า

$\Delta V_c$  (mV)



Temp. (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$\Delta V_c$ (mV)	0.1	0.8	1.5	2.5	2.9	2.5	2.8	3.1	4.0
$\Delta V_c$ (mV)	0.4	0.6	0.4	0.9	1.2	1.7	1.8	1.9	2.0

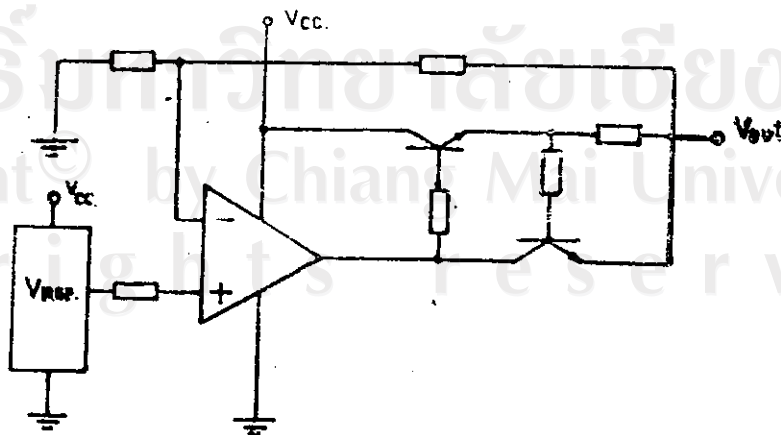
รูปที่ 4.16 ผลการทดลอง 2 ครั้งของวงจรแรงดันอ้างอิงแบบ D, HAMPPEL  
 โหผลารทดลอง  $\Delta V_c = 0.1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  และ  $0.04 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

โดยการทดลองครั้งที่ 1 ให้ค่า  $\Delta V_o$  สูงสุด 4 มิลลิโวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 30°ซ - 70°ซ

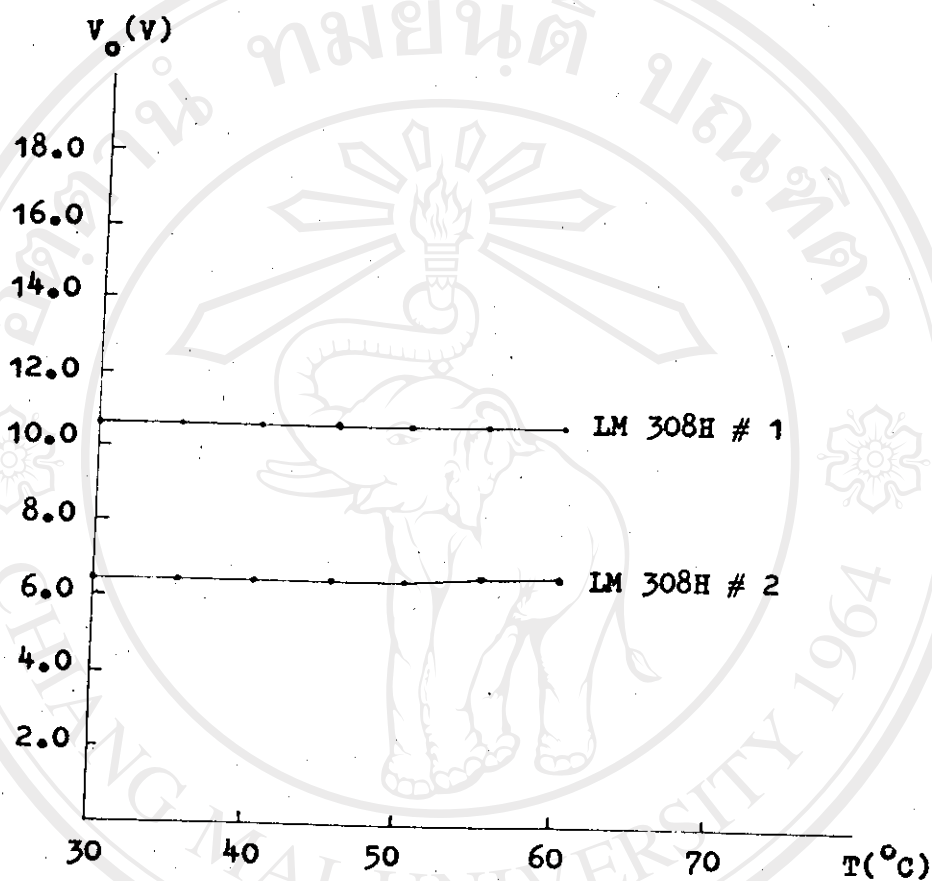
และการทดลองครั้งที่ 2 ให้ผลเปลี่ยนไป 2 มิลลิโวลต์ ในช่วงอุณหภูมิ 30° - 70°ซ

ซึ่งผลการทดลองที่แตกต่างกัน 2 ครั้งนั้นมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก อันอาจเนื่องมาจากความผิดพลาดในการวัดของการทดลอง 2 ครั้งนั้น ข้อดีของวงจรนี้คือแรงดันอ้างอิงจะประมาณ  $\frac{1}{4}$  ของแรงดันไฟเลี้ยงวงจร ซึ่งจะเป็นการลดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขาเข้าได้ 4 เท่า ซึ่งเป็นข้อดีอย่างหนึ่งซึ่งเราใช้แรงดันขาเข้าที่ผ่านการคงค่าแรงดันแล้วจะทำให้วงจรของ D. HAMPEL มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิค่าลงได้ ผลการทดลองให้  $\Delta V_o = 0.1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  และ  $0.04 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

จากการทดลองของวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงแบบของ D. HAMPEL ถ้าจะนำไปใช้งานเพื่อจ่ายกระแสให้โหลดมากขึ้น จำเป็นต้องต่อกับชุดขยายความสามารถจ่ายกระแสและเพิ่มแรงดันออก ซึ่งอาจเรียกว่าชุดวงจรคงค่าแรงดัน ซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์และทรานซิสเตอร์ขยายกระแสและมีทรานซิสเตอร์จำกัดกระแสด้วย วงจรมีแสดงดังรูปที่ 4.17



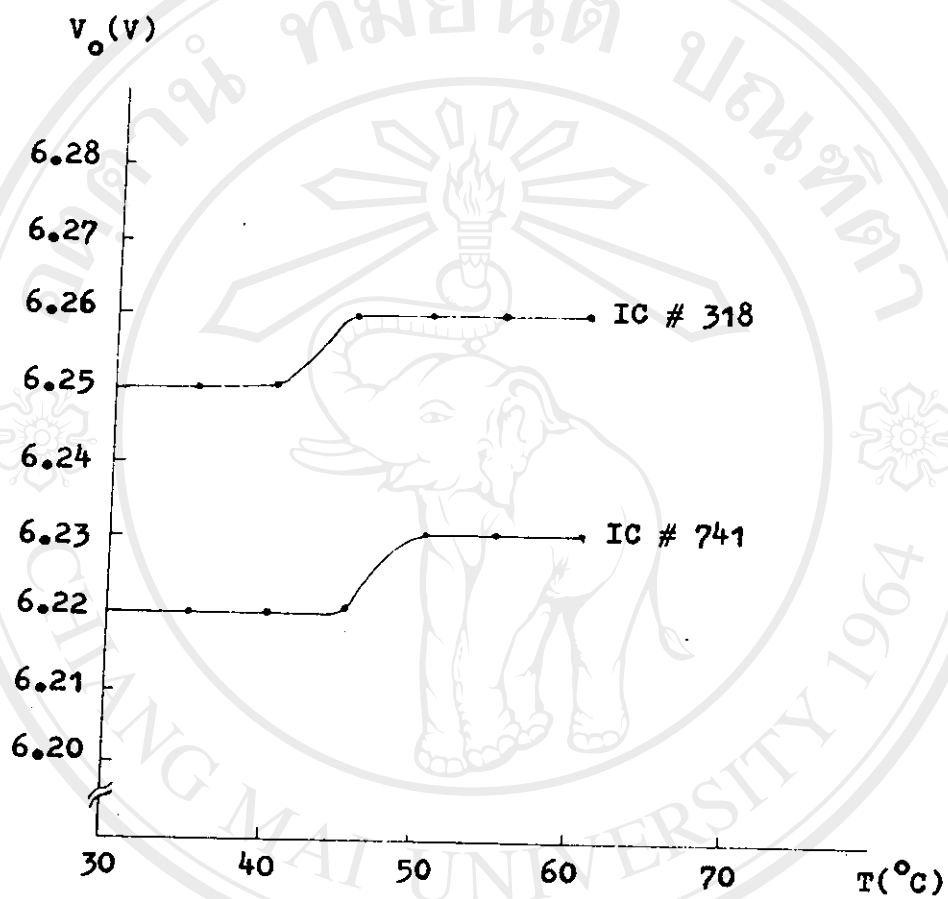
รูปที่ 4.17 การขยายกระแสและเพิ่มขนาดของแรงดันอ้างอิง



Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )		30	35	40	45	50	55	60
IC LM 308H #1	$V_o$	11.13	11.13	11.13	11.13	11.13	11.13	11.13
	$V_{REF}$	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64
IC LM 308H #2	$V_o$	6.22	6.22	6.22	6.22	6.22	6.23	6.23
	$V_{REF}$	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59

รูปที่ 4.18 ผลการทดลองขยายกระแสจรรยาแรงดันอ้างอิงของ D. HAMPEL ด้วย  
จรรยาเบอร์ 308H 2 ตัว ที่ไฟเลี้ยงจรรยาของแรงดันอ้างอิงต่างกัน  
โผล่ของแรงดันออกเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วง  $30^{\circ}\text{C}$ - $60^{\circ}\text{C}$





Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )		30	35	40	45	50	55	60
IC 318	$V_o$	6.25	6.25	6.25	6.26	6.26	6.26	6.26
	$V_{REF}$	2.59	2.59	2.59	2.59	2.60	2.60	2.60
IC 741	$V_o$	6.22	6.22	6.22	6.22	6.23	6.23	6.23
	$V_{REF}$	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.60

รูปที่ 4.19 ผลการทดลองขยายกระแสจากแรงดันอ้างอิงของ D. HAMPEL ด้วย วงจรรวม 2 เบอร์ คือ 318, 741 ได้ผลการทดลองไว้ที่เมื่ออุณหภูมิ เลข  $45^{\circ}\text{C}$  ขึ้นไป

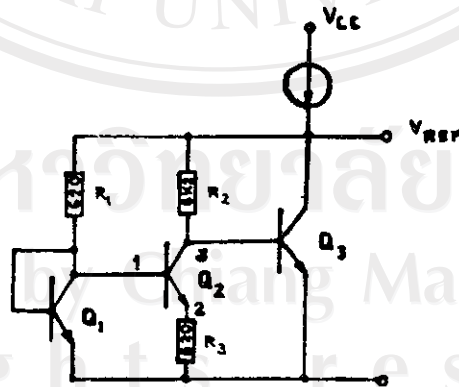
ผลการทดลองไคแรงดันออกจากวงจรรวม คาทาง ๆ ของ LM 308H # 1 และ LM 308H # 2, LM 318 และ LM 741

กรณีของ LM 308H ไคค่า  $\Delta V_o$  สูงสุด 10 mV. ในช่วง  $30^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$   $0.33 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  ซึ่งกรณีของ LM 308H นั้นใช้ค่าแรงดันอ้างอิงต่างกัน 2 ค่าคือ 4.64 โวลต์ และ 2.59 โวลต์ ทำให้แรงดันออกเปลี่ยนไปจาก 11.13 โวลต์ และ 6.22 โวลต์ตามลำดับ

สำหรับกรณีของวงจรรวม 318 และ 741 นั้นให้ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิไม่เที่ยง ไม่ควรใช้เป็นอุปกรณ์ในส่วนองแรงดันอ้างอิงที่ต้องการเสถียรภาพ

#### 4.3.5 ผลการทดลองของวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงแบบแบนด์แกพ

วงจรนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ทดลองสร้างขึ้นความถี่การสร้างแรงดันแบบแบนด์แกพของ วงจรรวมแรงดันอ้างอิง เพื่อหาว่ามีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิเป็นอย่างไร วงจรที่ใช้ทดลองเป็นดัง รูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงชนิดใช้แบนด์แกพ

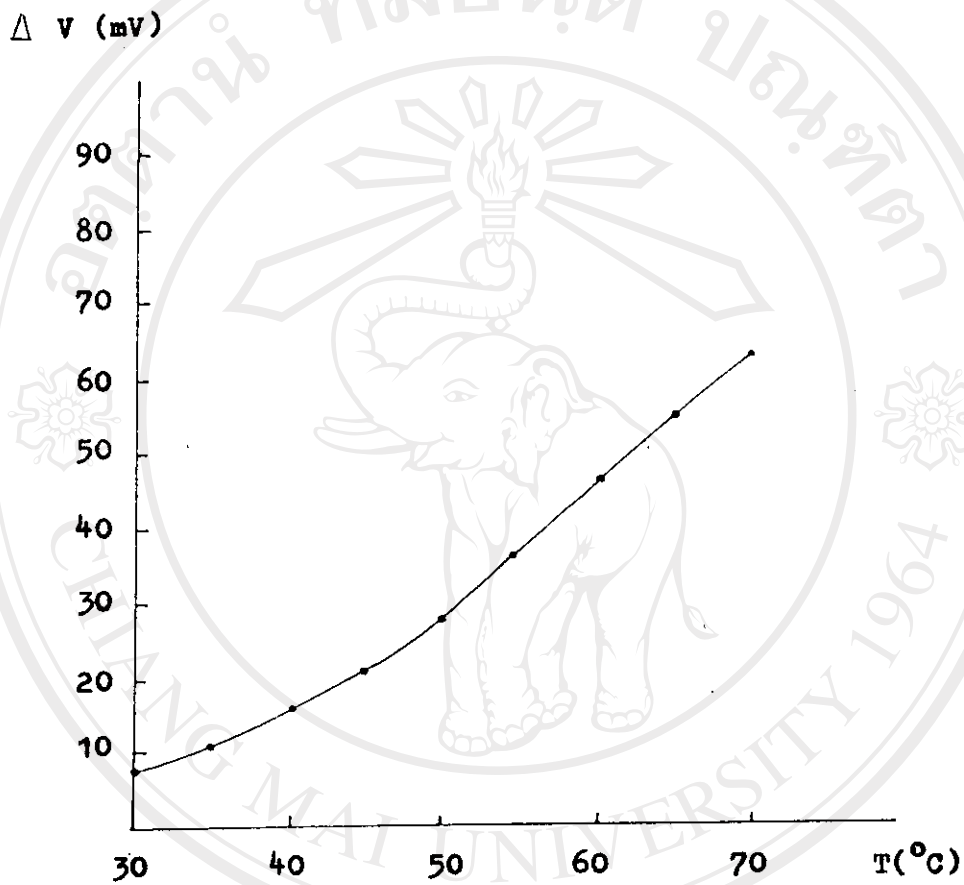
$$\text{จากการคำนวณ } V_{\text{Ref}} = V_{\text{BE}Q_3} + \Delta V_{\text{BE}Q_2} \frac{R_2}{R_3}$$

จากการใช้  $R_1 = 620\Omega, R_2 = 6K2\Omega, R_3 = 620\Omega$  ผลการทดลองวัดแรงดันอ้างอิงได้ 1.234 โวลต์ โกลเดียงทางทฤษฎีคือ 1.2 โวลต์ ที่ 22°ซ และผลการวัดแรงดันที่จุดต่าง ๆ มีดังนี้เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดแรงดัน ณ จุดต่าง ๆ ของแรงดันอ้างอิงแบบแบบคณภาพ

Temp. (°C)	22°C	70°C
$V_{\text{REF}}$ (V.)	1.234 V.	1.295 V.
Voltage 3.	0.693 V.	0.666 V.
Voltage 2.	52.7 mV	53.7 mV.
Voltage 1.	0.666 V	0.642 V.

จากผลการทดลอง  $\Delta V$  แปรไปดัง  $\frac{54 \text{ mV}}{40^\circ\text{C}} = 1.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  นับว่าเป็นผลการทดลองที่ไม่ดี สาเหตุอาจเกิดจากการใช้ทรานซิสเตอร์ที่ไม่มีคุณสมบัติ  $\text{emitter area}$  ตรงตามวงจรที่ออกแบบและไม่สามารถสร้างทรานซิสเตอร์ได้เช่นเดียวกับในการสร้างวงจรรวม ฉะนั้นวงจรแรงดันอ้างอิงที่สร้างโดยวิธีนี้จะไม่ได้ผลดีทางด้านเสถียรภาพทางอุณหภูมิ

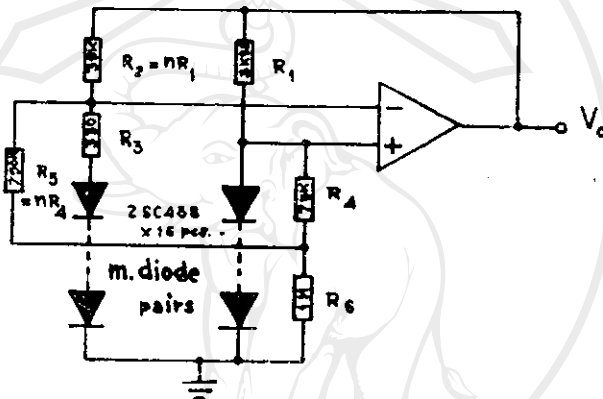


Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	30	35	40	45	50	55	60	65	70
V (mV)	7	10	15	20	27	35	45	53	61

รูปที่ 4.21 ผลการทดลอง แรงดันอ้างอิงแบบแผนค้แกท ให้า  $\Delta V = 1.3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$   
ซึ่งเป็นผลไมค้

4.3.6 ผลการทดลองแรงดันอ้างอิงของ KUIJK

จากรูปที่ 4.22 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิงที่ใช้ทรานซิสเตอร์มาต่อเป็น diode pair

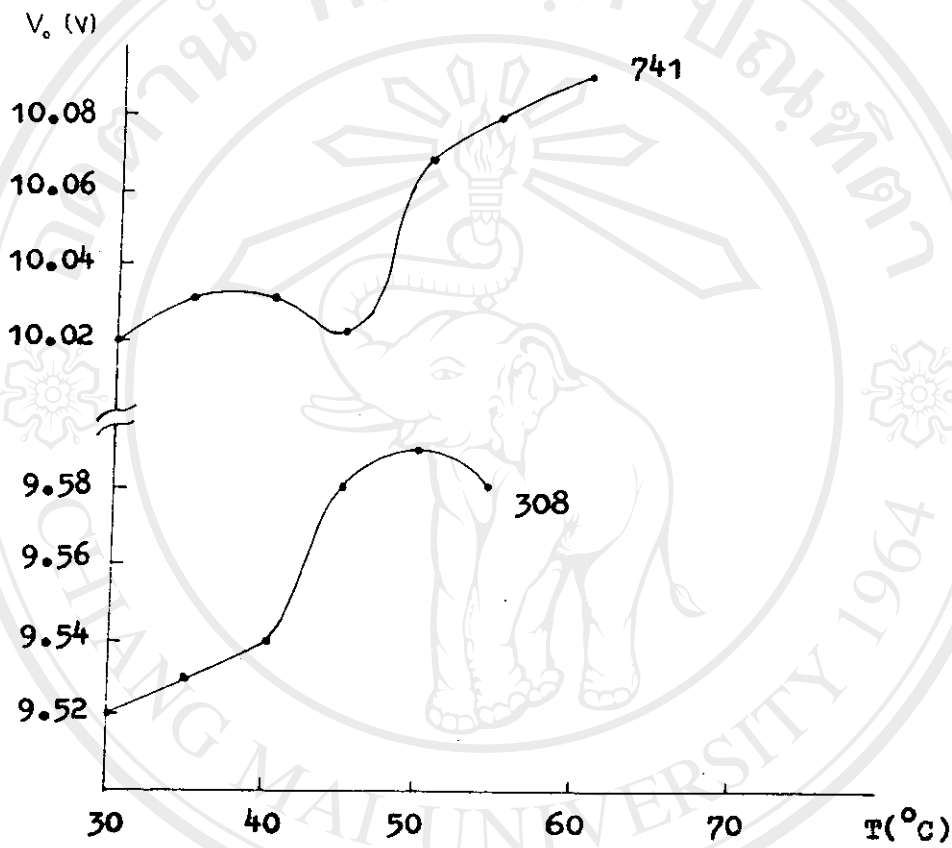


รูปที่ 4.22 วงจรสร้างแรงดันอ้างอิง KUIJK

ให้ผลการทดลองที่มีค่า  $\Delta V$  เมื่อใช้วงจรรวม 741 = 70 mV. ในช่วง  $30^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$  ข้อสังเกต ถ้าพิจารณาเฉพาะในช่วง  $30^{\circ}\text{C} - 45^{\circ}\text{C}$  ค่าที่ได้จะดีกว่าคือ

$\Delta V = 10 \text{ mV}$  เท่านั้น คือประมาณ  $\frac{10}{15} = 0.65 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  เช่นเดียวกับ 308 ที่มีค่า

$\Delta V = 60-70 \text{ mV}$  ในช่วง  $30^{\circ} - 60^{\circ}\text{C}$  แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะช่วง  $30^{\circ}\text{C}-45^{\circ}\text{C}$  จะดีกว่า ด้วยเหตุผลที่ว่าวงจรรวมที่กำหนดในท้องตลาดมักเป็นเกรดทางการค้า อุณหภูมิสูงขึ้นเกินค่าที่กำหนดก็จะได้ผลดีในการทำงานของวงจรรวมเหล่านั้น



Temp. ( $^{\circ}\text{C}$ )	30	35	40	45	50	55	60
$V_{out}$ (V) IC 741	10.02	10.03	10.03	10.02	10.07	10.08	10.09
$V_{out}$ (V) IC 308	9.52	9.53	9.54	9.58	9.59	9.58	9.46

รูปที่ 4.23 ผลการทดลองของแรงดันอ้างอิงแบบ KUIJK

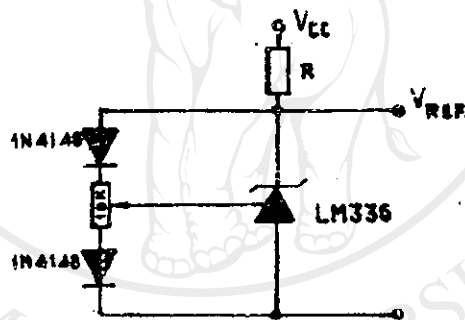
$\Delta V_o \approx 70 \text{ mV}$  ในช่วง  $30^{\circ}\text{C}-60^{\circ}\text{C}$  เมื่อใช้วงจรรวม 741

$\Delta V_o \approx 70 \text{ mV}$  ในช่วง  $30^{\circ}\text{C}-60^{\circ}\text{C}$  เมื่อใช้วงจรรวม 308

#### 4.3.7 ผลการทดลองของวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงใช้วงจรรวมเบอร์ LM 336

ในการทดลองสร้างแรงดันอ้างอิงที่ศึกษาและทดลองมานั้น การเลือกใช้อุปกรณ์ เช่นทรานซิสเตอร์หรือซีเนอร์ไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงไปใช้ตัวอื่นคุณสมบัติก็เปลี่ยนไป เพื่อให้ได้ การสร้างที่ง่ายและตรงไปตรงมาคือการเลือกใช้วงจรรวมชนิดแรงดันอ้างอิงที่เที่ยงตรง

การทดลองต่อไปคือเลือกใช้วงจรรวม LM 336H 2.5 V ซึ่งเป็นวงจรรวมแรงดันอ้างอิงที่หาซื้อได้ในตลาดขณะทำการทดลอง เมื่อต่อวงจรดังรูปที่ 4.24



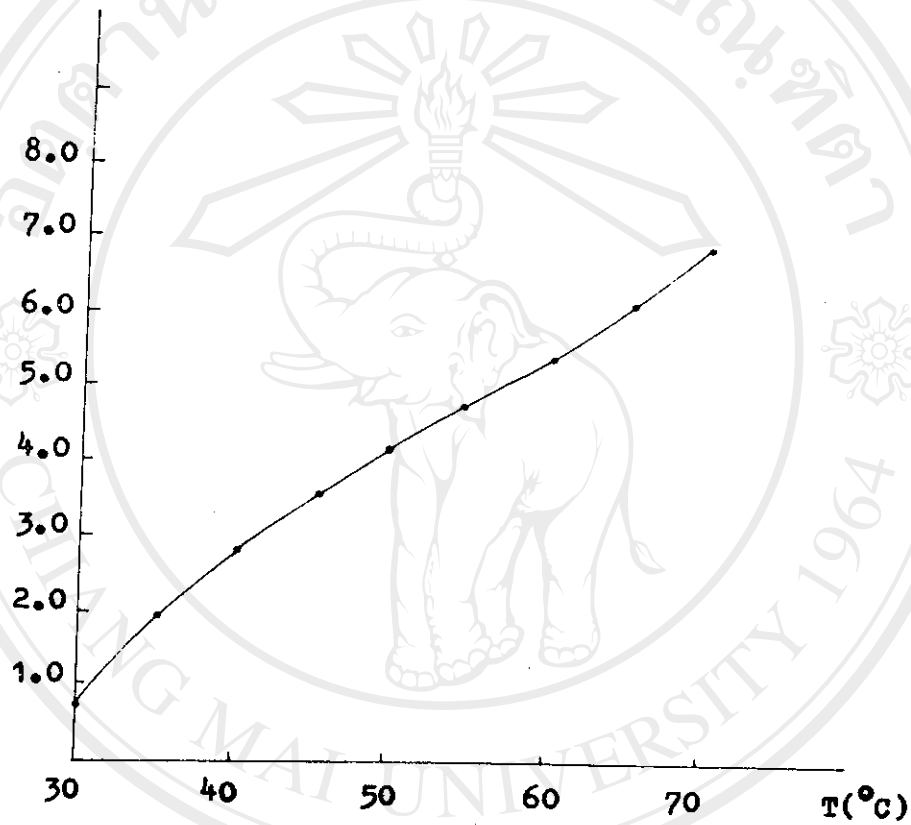
รูปที่ 4.24 วงจรแรงดันอ้างอิงของวงจรรวม LM 336

ผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของวงจรรวม LM 336 H-2.5V ให้ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิสูงสุด  $\Delta V = 6 \text{ mV}$  ในช่วง  $30^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$

$$\text{คิดเป็น } \Delta V = \frac{6 \text{ mV}}{40} = 0.15 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

นับว่าวงจรรวม LM 336H-2.5 V. เป็นวงจรรวมให้แรงดันอ้างอิงที่ให้สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ ถ้าปรับความต้านทานปรับค่าได้ให้ได้แรงดัน 2.490 โวลต์ ณ อุณหภูมิห้องจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำในการสร้างจึงใช้วงจรรวม LM 336H-2.5 V โดยการวางให้ 1N4148 และ R 10 K $\Omega$ ใกล้กับ LM 336 ใหม่มากเพื่อให้ผลแตกต่างทางอุณหภูมิ



$\Delta V_o$  (mV)

Temp. (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$\Delta V_o$ (mV)	0.8	1.9	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	6.0	6.7

รูปที่ 4.25 ผลการทดลองวัดการเปลี่ยนแปลงแรงดันอ้างอิงของวงจรรวมเบอร์

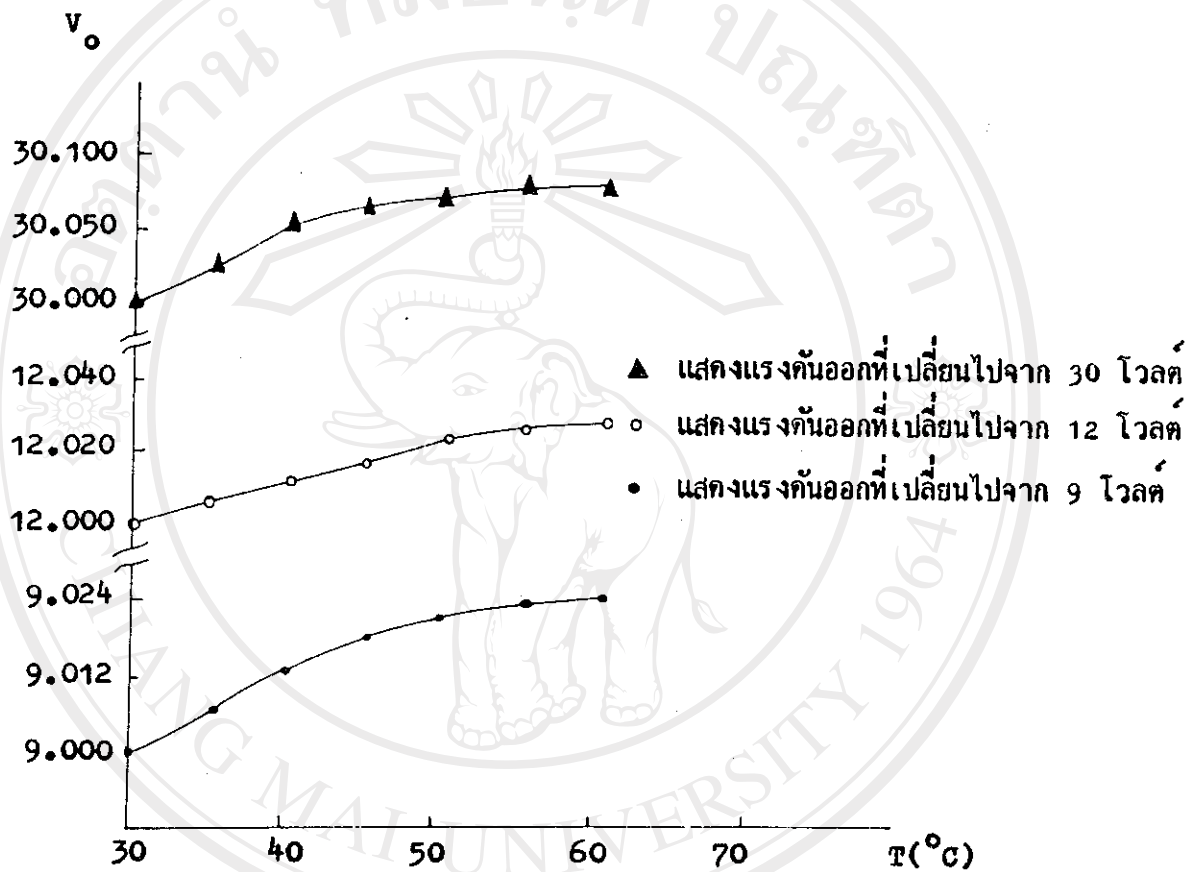
$$\text{LM 336H} - 2.5 \text{ V. มีค่า } \Delta V_o = \frac{6.0 \text{ mV}}{40^\circ\text{C}} = 0.15 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

มีน้อย ความต้านทานก็ควรมีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิค่า

#### 4.3.8 ผลการทดลองวงจรที่สร้างสมบูรณ์

ผลการทดลองเมื่อใช้วงจรรวม LM 336 พร้อมกับ LM 308H เป็นแรงดันอ้างอิงให้แรงดันออก 4.990 โวลต์ แล้วใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงคงค่าแรงดัน โดยการปรับแรงดันออกไว้ที่ 9.000 โวลต์ และ 12.000 โวลต์ และ 30.000 โวลต์ แล้วทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 30°C ถึง 60°C

ผลของแรงดันออกสูงขึ้นและมีค่าแตกต่างกันมากที่แรงดันออกสูง ๆ เช่น 30 โวลต์ มากกว่า 9 โวลต์ แสดงว่าค่าอัตราเพิ่มของแรงดันออกเป็นผลมาจากแรงดันอ้างอิง Reference Voltage อัตราการเปลี่ยนแปลงไปสู่สุดของแรงดันออกอยู่ที่ 90 mV ในช่วง 30°C-60°C ดังกราฟและผลการทดลอง



รูปที่ 4.26 ผลการทดลองผลของแรงดันออกของวงจรคงค่าแรงดันที่สร้างขึ้นจากแรงดันอ้างอิงของ LM 336 และ LM 308H เป็นวงจรบัฟเฟอร์

ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปผลการพิจารณาเลือกใช้วงจรแรงดันอ้างอิง

ชื่อผู้พิจารณา	5.1 V Zener diode Selected device	TC. zener constant current	stack zener	Band gap	D. HAMPEL	K.E. KUIJK	LM 336	7805
ชื่อผู้ 1. ความสะดวกในการต่อ วงจร	*****	**	*	-	-	-	***	****
2. สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิ ต่ำ	*****	****	**	-	****	-	***	*
3. เทคนิควงจรที่แตกต่าง ดีเลือกอุปกรณ์	-	**	-	***	**	***	-	-
ชื่อเสีย	**	***	**	****	**	****	-	-
1. ศึกษากิจกรรมคัดเลือก อุปกรณ์	***	***	***	-	-	-	-	-
2. ระบุคุณสมบัติของอุปกรณ์	***	***	***	-	-	-	-	-

**การแก้ไขปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรง**

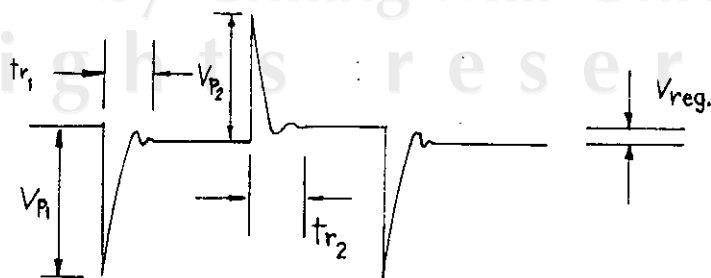
จากการทดลองเห็นว่า ข้อที่ควรพิจารณามากที่สุดคือการเลือกแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงที่มีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิที่ต่ำที่สุด เมื่อเลือกใช้แหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิงชนิดใดแล้วถ้ามีความต้องการจะใช้ขยายให้กระแสเสถียรมากกว่าการใช้วงจรบีเพอร์ ออพแอมป์ที่ใช้ต้องมีครีฟค่า ๆ โดยแนะนำใช้ LM 308 H อุปกรณ์อื่น เช่น ความต้านทานหรือตัวเก็บประจุที่ใช้ต้องมีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำ

เมื่อประกอบอุปกรณ์แล้วควรพิจารณาในแง่อุปกรณ์สำคัญในแรงดันอ้างอิงต้องมีค่าอุณหภูมิรอบข้างเท่า ๆ กันคือวางให้ชิดกัน นอกจากนั้นการป้องกันความร้อนที่แปรเปลี่ยนอย่างไวก็ควรใช้ป้องกันแหล่งจ่ายแรงดันอ้างอิง เช่น การใช้กล่องโลหะใส่ปิคนิคอีกครึ่งหนึ่งหรือการใช้ฉนวนความร้อนกันมิให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว

การระบายความร้อนให้ทรานซิสเตอร์กำลังก็เป็นสิ่งจำเป็นเพื่อป้องกันความร้อนจากรอยต่อภายในเป็นผลให้ทรานซิสเตอร์ร้อนขึ้นและจะไม่เสถียรภาพ สิ่งเหล่านี้ควรเป็นสิ่งที่พิจารณาในการใช้เครื่องจ่ายไฟกระแสตรงที่มีเสถียรภาพทางอุณหภูมิก็ตามต้องการ

**4.4 ผลการทดลองด้านการตอบสนอง**

การทดลองวัดค่าการตอบสนองของวงจร หาโดยต่อสวิทช์ซึ่งไหลคเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ แล้วใช้ข้อสวิตช์โลสไปวัดรูปคลื่นสัญญาณและวัด  $t_{r1}, t_{r2}$  ฯลฯ ตามข้อกำหนดต่อไปนี้



รูปที่ 4.27 รูปแบบการตอบสนองของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรง

$tr_1$  = No-load to Full-load recovery time

$tr_2$  = Full-load to No-load recovery time

$V_{p1}$  = No-load to Full-load transient peak

$V_{p2}$  = Full-load to No-load transient peak

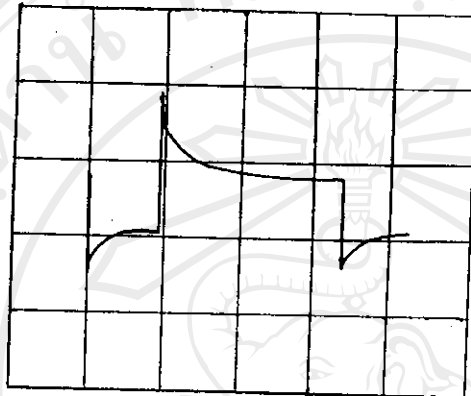
$V_{reg.}$  = regulating voltage

ผลการทดลองด้านการตอบสนอง ที่มีการแปรชนิดของวงจรรวม 3 วงจรรวมโดยค่า  
กระแสแรงดันออกเท่าเดิมที่ 150 มิลลิแอมแปร์ และ 12.00 โวลต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Copyright© by Chiang Mai University

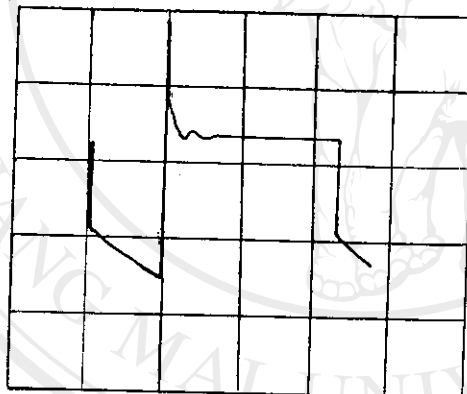
All rights reserved



IC 741

0.5 ms/div

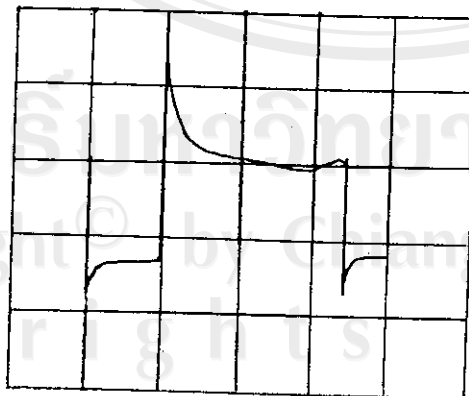
20 mV/div

 $tr_1 \leq 0.2 \text{ ms}$  $Tr_2 = 2SC 1226 A, Co = 22MFD.$ Slew rate 741 = 0.5 V/ $\mu$ s $f_T = 1.2 \text{ MHz.}$ 

IC 357

0.5 ms/div

20 mV/div

 $tr_1 \leq 0.3 \text{ ms}$  $Tr_2 = 2SC 1226 A, Co = 22 \text{ MFD.}$ Slew rate 357 = 50 V/ $\mu$ s $f_T = 20 \text{ MHz.}$ 

IC 318

0.5 ms/div

20 mV/div

 $tr_1 \leq 0.1 \text{ ms}$  $Tr_2 = 2SC 1226 A, Co = 22 \text{ MFD.}$ Slew rate 318 = 70 V/ $\mu$ s $f_T = 15 \text{ MHz.}$ 

รูปที่ 4.28 รูปการตอบสนองของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรงกับการใช้วงจรรวม  
3 ตัวอย่าง



### วิเคราะห์ผลการทดลองด้านการตอบสนอง

การตอบสนองของเครื่องจ่ายไฟกระแสตรง จะเร็วมากขึ้นกับการปรับปรุง ดังนี้

1. การใช้ทรานซิสเตอร์ที่  $F_{T_{max}}$  สูง ๆ และไวต่อการตอบสนอง
2. การใช้ออฟแอมป์ที่ไวและมีค่า Slew rate สูง เช่น 318 จะให้ผลเร็วกว่า
3. ค่า Settling time ของออฟแอมป์ต้องเลือกใช้ที่มีค่า Settling time น้อย ๆ
4. ค่าของตัวเก็บประจุที่ต่อที่แรงดันออกของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจะมีผลต่อการตอบสนอง คือถ้าตัวเก็บประจุมีค่ามากจะตอบสนองจาก  $tr_1$  น้อย ๆ และ  $tr_2$  จะมาก
5. การเลือกใช้ตัวเก็บประจุในการชดเชยความถี่ของออฟแอมป์ควรเลือกใช้ให้เหมาะสมทั้งทางด้านขาเข้า และขาออกโดยต่อกับขาชดเชยความถี่ของออฟแอมป์ตามขอมูลที่แนะนำของออฟแอมป์เหล่านั้น