หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การทดลอง ผลการทดลอง สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 การปรับอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อทำการปรับอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ โดยตรวจดูลักษณะของสัญญาณจากภาคต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ จากลักษณะของสัญญาณเหล่านี้จะทำให้สามารถตัดสินใจได้ว่าควรจะปรับอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์อย่างไรจึงจะทำให้ผลการทดลองอื่น ๆ ถูกต้องมากที่สุด

5.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ก. เครื่องกำเนิดสัญญาณ หมายเลข 419 จำนวน 1 เครื่อง

ข. เครื่องขยายล่วงหน้า " 109 A และ 1406 " 2 "

ค. เครื่องขยาย " 2010 " 2 "

ง. เครื่องขยายหน่วงเหนี่ยว" 1457 " 2 "

จ. อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

ฉ. ออสซิลโลสโคป

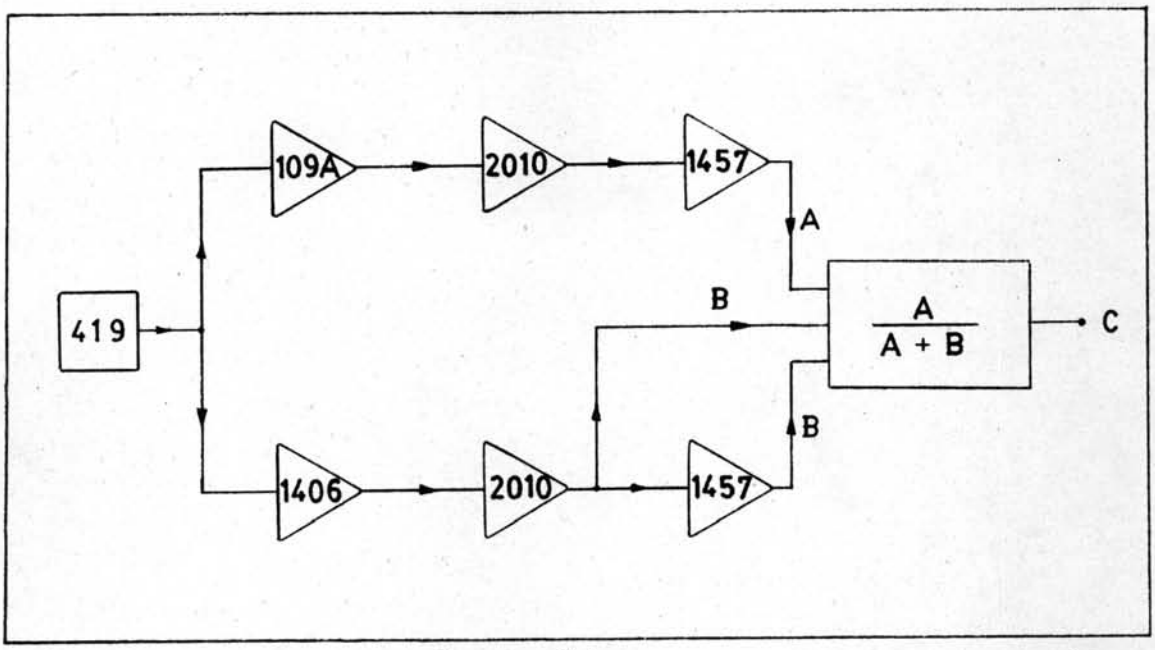
5.1.2 ขั้นตอนในการทดลอง

ก. จัดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 5.1

ข. ปิดสวิทช์เพื่อจ่ายกำลังให้แก่อุปกรณ์ต่าง ๆ ทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที แล้วทำการปรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สัญญาณมีลักษณะดังนี้

ข.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ

- เวลาขึ้นของสัญญาณเท่ากับ 50 นาโนวินาที
- สัญญาณคายมีขั้วเป็นลบ
- ความถี่ของสัญญาณเท่ากับ 50 เฮิร์ต



รูปที่ 5.1 แผนผังแสดงการจัดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาลักษณะของสัญญาณจากภาคต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

ข.2 เครื่องขยายล่วงหน้าหมายเลข 109 A

-กำลังขยายเท่ากับหนึ่ง

ข.3 เครื่องขยาย

-สัญญาณคายเป็นแบบขั้วเดี่ยวและมีขั้วเป็นบวก

ข.4 เครื่องขยายหน่วงเหนี่ยว

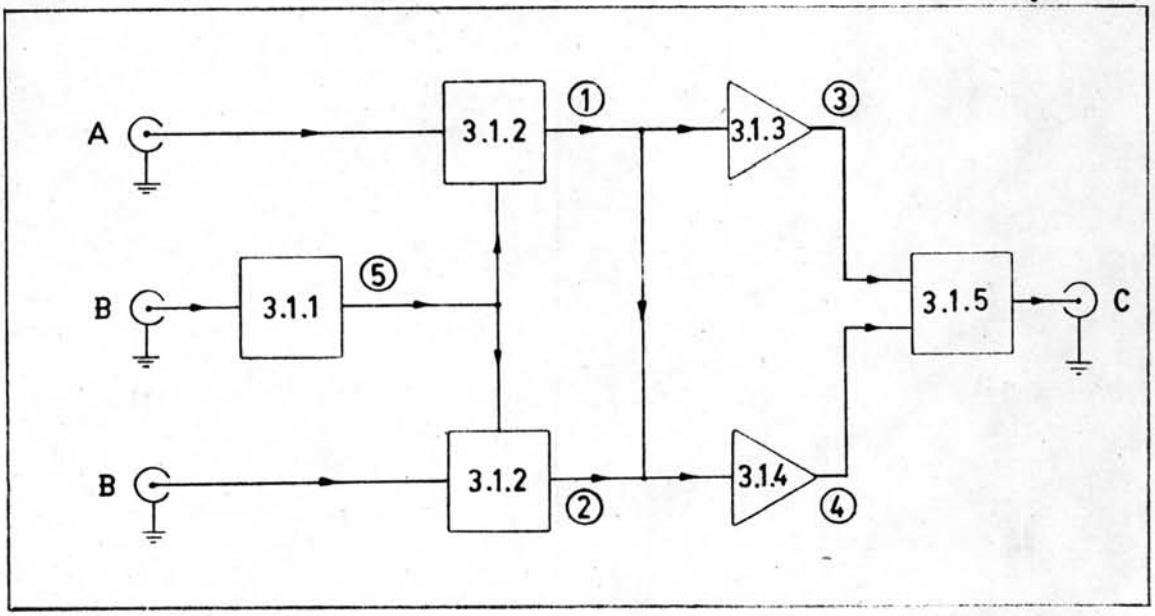
-กำลังขยายเท่ากับหนึ่ง

-สัญญาณคายมีขั้วเป็นบวก

ค. ปรับกำลังขยายของเครื่องขยายทั้งสองเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B ที่จะป้อนเข้าสู่อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์มีค่าต่าง ๆ

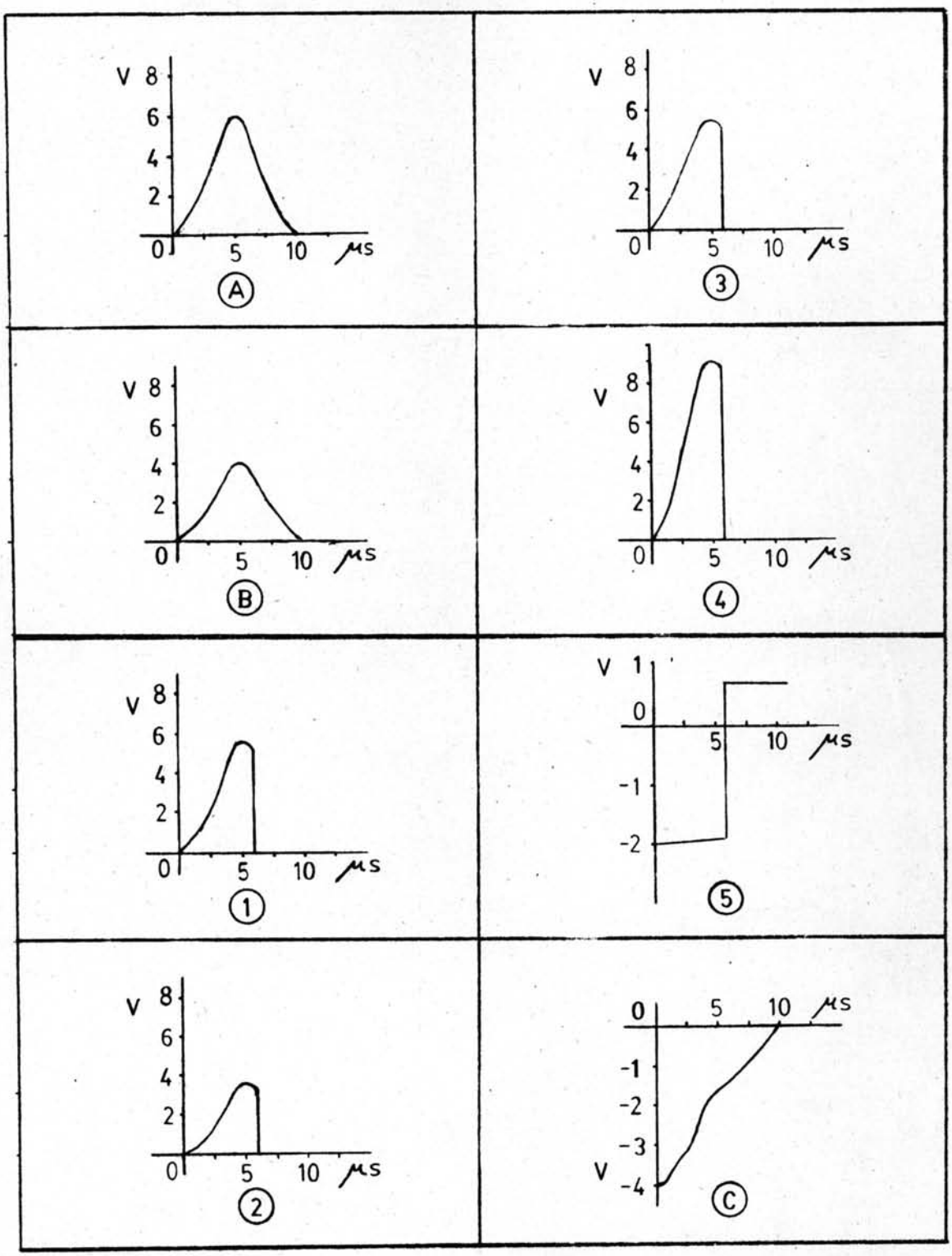
ง. ใช้ออสซิลโลสโคปตรวจดูลักษณะของสัญญาณจากภาคต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

5.1.3 ผลการทดลอง รูปที่ 5.2 แสดงแผนผังของภาคต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ และรูปที่ 5.3 แสดงลักษณะของสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตามที่ระบุไว้ในรูปที่ 5.2 เมื่อแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณป้อน A และ B เท่ากับ 6 และ 4 โวลท์ตามลำดับ จากรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 แสดงแผนผังของภาคต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

สัญญาณป้อน A และ B มีลักษณะเป็นแบบเกาว์เซียนและฐานของสัญญาณกว้างเท่ากับ 10 ไมโครวินาที ถ้าปรับที่เครื่องขยายให้ฐานของสัญญาณแคบกว่านี้มาก ๆ จะทำให้อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ไม่สามารถทำงานได้ทัน



รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะของสัญญาณจากภาคต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์อิเลกโทรนิค สำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

เพื่อให้สัญญาณคายมีลักษณะเหมาะสมกับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ จะต้องปรับให้สัญญาณจากภาคกำเนิดสัญญาณมีความกว้างเท่ากับ 6 ไมโครวินาทีซึ่งจะส่งผลไปทำให้สัญญาณที่ผ่านภาคสวิทช์ทั้งสองมีความกว้างเท่ากับ 6 ไมโครวินาทีเช่นกัน และมีลักษณะดังแสดงในรูป เมื่อแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณป้อน A และ B มีค่าต่างไปจากนี้ สัญญาณที่ได้จากภาคต่าง ๆ ภายในอุปกรณ์อิเลกโทรนิคจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.3 นี้เช่นกัน

5.2 <u>สภาพเชิงเส้นของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง</u>

5.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ก. เครื่องกำเนิดสัญญาณ หมายเลข 419 จำนวน 1 เครื่อง

ข. เครื่องขยายล่วงหน้า " 109A " 1 "

ค. เครื่องขยาย " 2010 " 1 "

ง. เครื่องขยายหน่วงเหนี่ยว " 1457 " 1 "

จ. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง

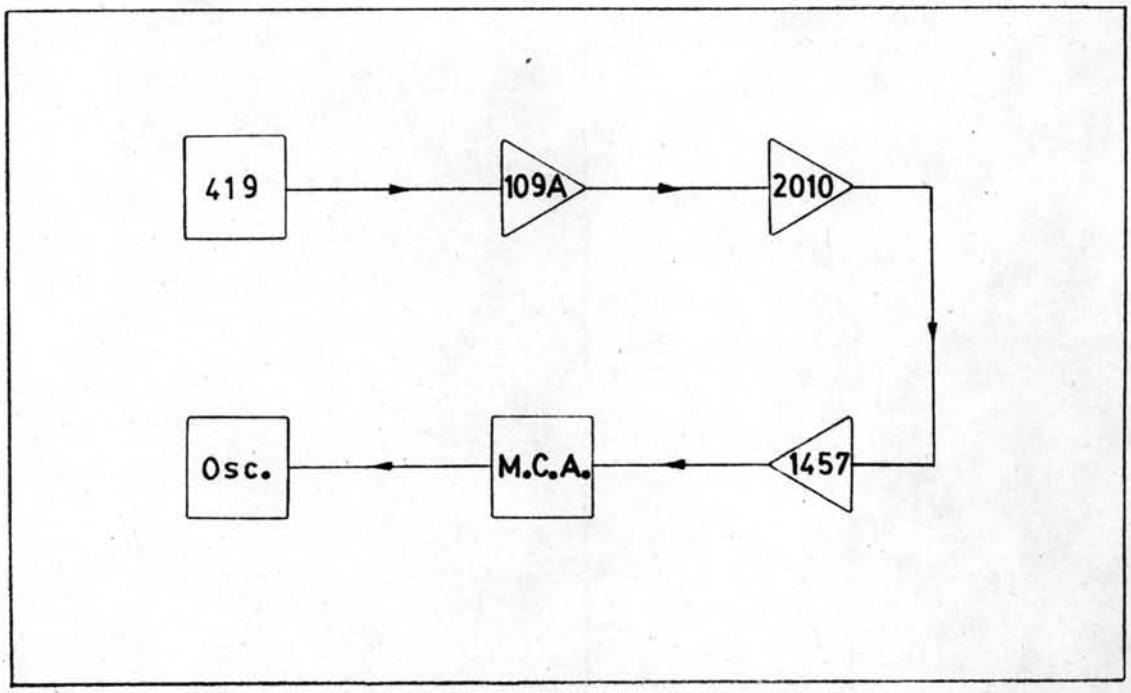
ฉ. ออสซิลโลสโคป

5.2.2 ขั้นตอนในการทดลอง

ก. จัดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดลองดังแสดงในแผนผังรูปที่ 5.4

ข. ปิดสวิทช์เพื่อจ่ายกำลังให้แก่อุปกรณ์ต่าง ๆ ทำการปรับอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับข้อ ข. ในหัวข้อที่ 5.1.2 ยกเว้นเฉพาะเครื่องขยายหน่วงเหนี่ยวซึ่งจะต้องปรับให้สัญญาณคายมีขั้วเป็นลบ

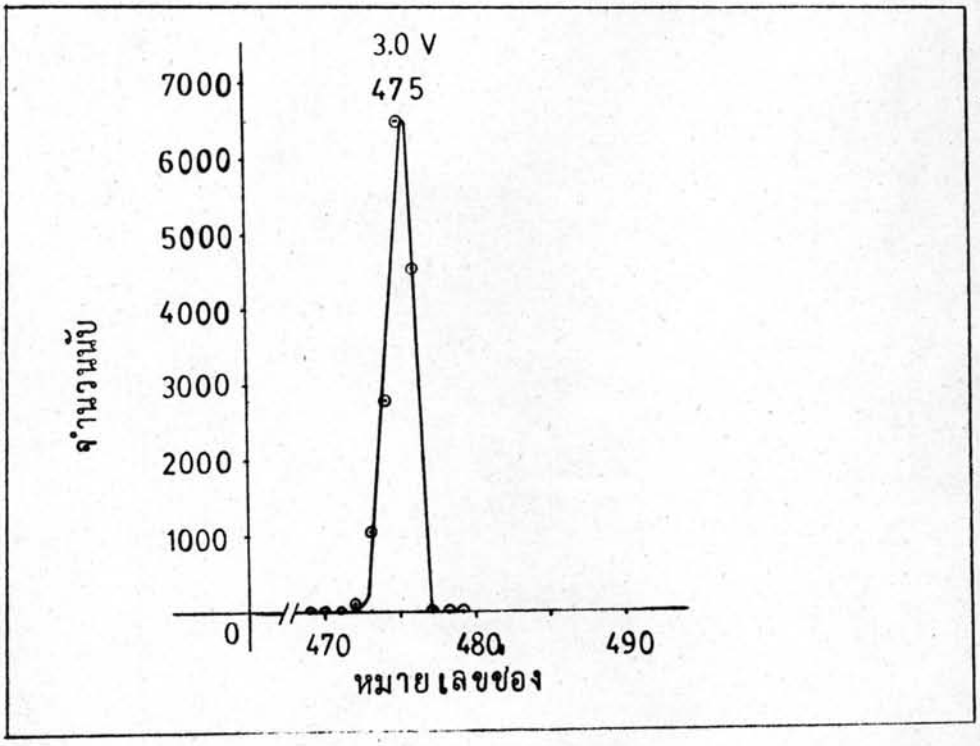
ค. ทำการวิเคราะห์สภาพเชิงเส้นของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง



รูปที่ 5.4 แสดงแผนผังการจัดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์สภาพเชิงเส้นของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง

โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างหมายเลขช่องและแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่ป้อนเข้าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ ในการนี้กระทำได้โดยการปรับกำลังขยายของเครื่องขยายเพื่อให้สัญญาณป้อนเข้าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนไปทีละ 0.5 โวลท์ โดยเริ่มต้นจาก 1.5 โวลท์ จนถึง 6 โวลท์ การเก็บข้อมูลแต่ละครั้งใช้เวลา 5 นาที

5.2.3 ผลการทดลอง รูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างของกราฟอันหนึ่งซึ่งได้จากเครื่องวิเคราะห์เมื่อแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณป้อนมีค่าเท่ากับ 3.0 โวลท์ จากกราฟนี้จะเห็นว่ายอดของกราฟตรงกับหมายเลขช่องที่ 475 ข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองในหัวข้อนี้แสดงในตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.6 แสดงสภาพเชิงเส้นของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ เส้นกราฟในรูปเป็นเส้นกราฟที่ดีที่สุด



รูปที่ 5.5 แสดงกราฟที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์สัญญาณเมื่อสัญญาณป้อนมีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3.0 โวลท์

แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณป้อน (โวลท์)	หมายเลขช่อง
- 1.5	277
- 2.0	338
- 2.5	409
- 3.0	475
- 3.5	541

แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณป้อน (โวลท์)	หมายเลขช่อง
- 4.0	614
- 4.5	681
- 5.0	740
- 5.5	822
- 6.0	880

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลจากการวิเคราะห์สภาพเชิงเส้นของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง

5.3 สภาพเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

5.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ก. เครื่องกำเนิดสัญญาณ หมายเลข 419 จำนวน 1 เครื่อง

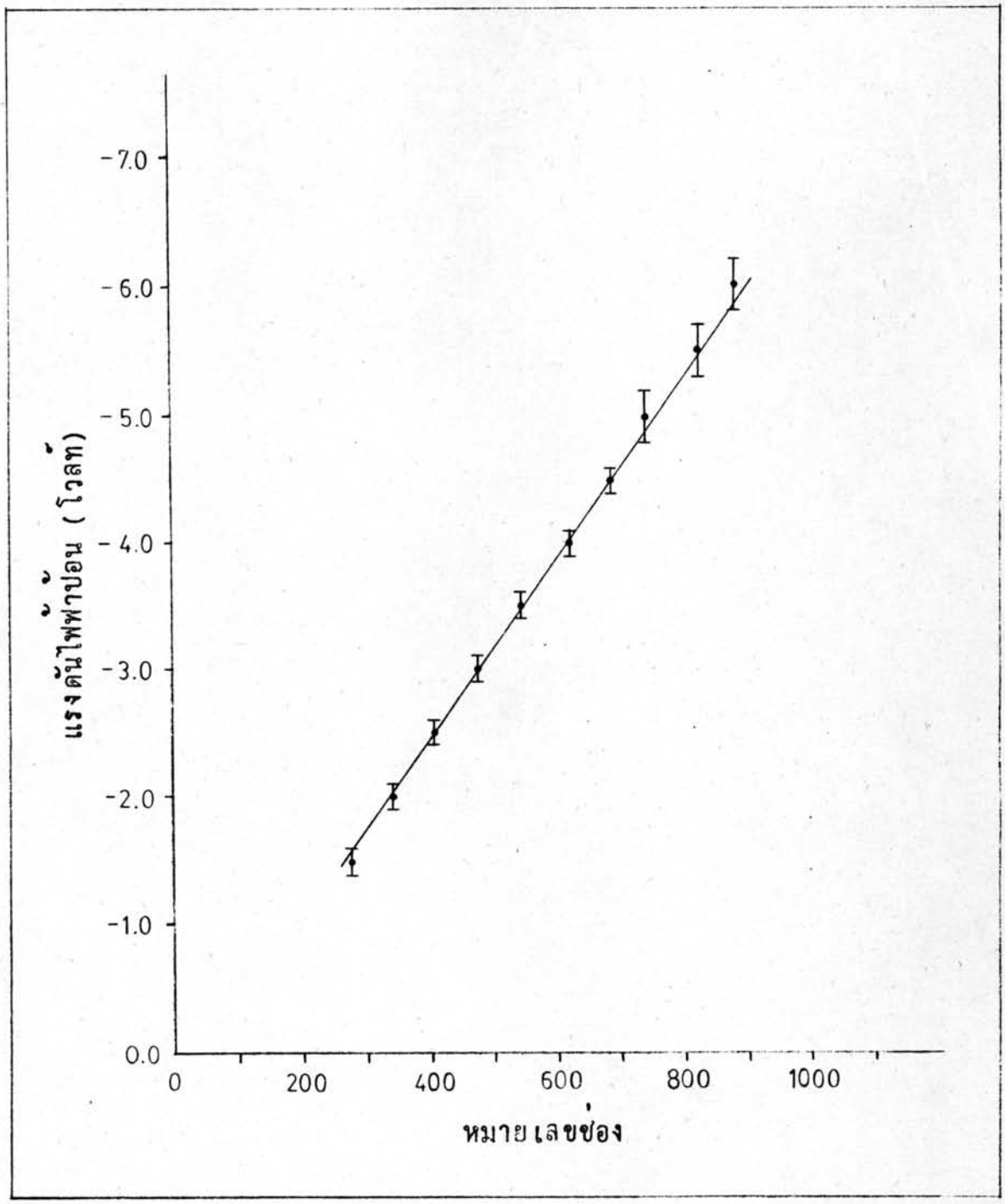
ข. เครื่องขยายล่วงหน้า " 109A และ 1406 " 2 "

ค. เครื่องขยาย " 2010 " 2 "

ง. เครื่องขยายหน่วงเหนี่ยว " 1457 " 2 "

จ. อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

ฉ. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง



รูปที่ 5.6 แสดงสภาพเชิงเส้นของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง

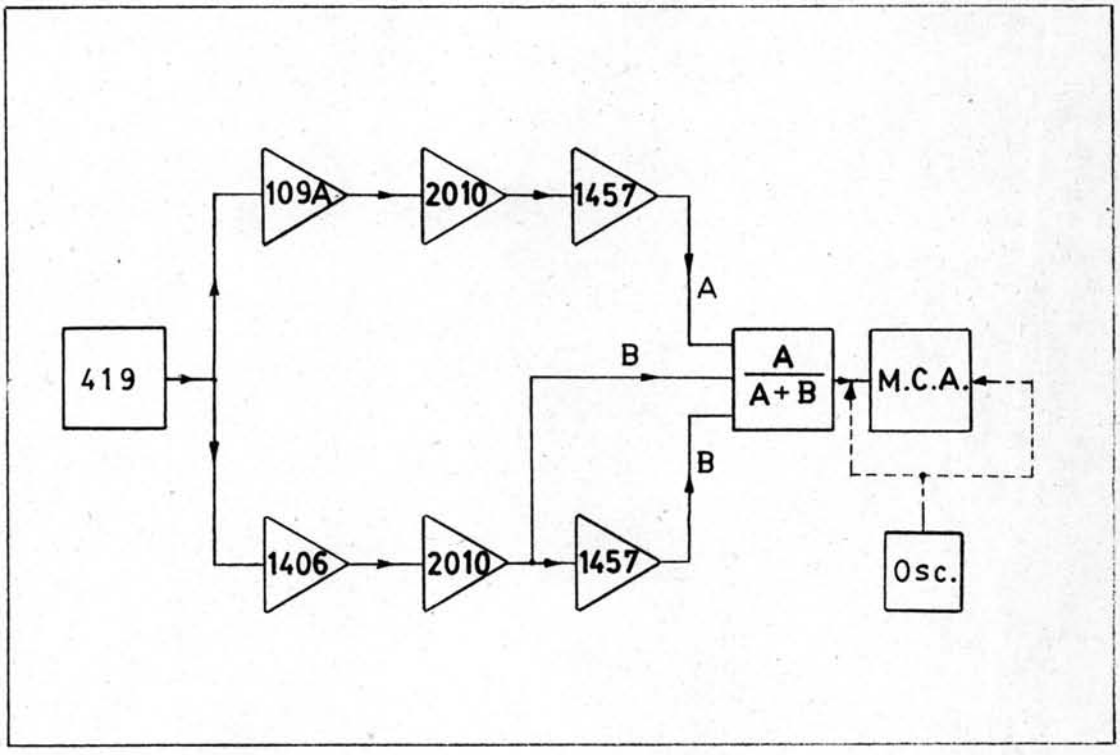
ช. ออสซิลโลสโคป

5.3.2 ขั้นตอนในการทดลอง

ก. จัดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ตั้งแสดงในแผนผังรูปที่ 5.7

ข. ปิดสวิทช์เพื่อจ่ายกำลังให้แก่อุปกรณ์ต่าง ๆ ทำการปรับอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับข้อ ข. ในหัวข้อที่ 5.1.2

ค. ทำการวิเคราะห์สภาพเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าของ

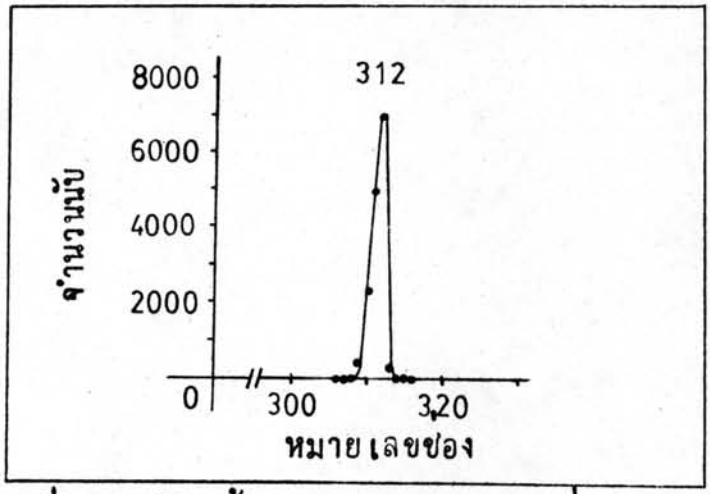


รูปที่ 5.7 แสดงแผนผังการจัดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์สภาพเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

สัญญาณป้อนกับสัญญาณคายของอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ และระหว่างแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณป้อนเข้าสู่อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของ

ฟิชชันแฟรกเมนต์กับหมายเลขช่องของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ ในการนี้การปรับแรงดันไฟฟ้ากระทำได้โดยการปรับกำลังขยายของเครื่องขยายทั้ง 2 เครื่อง การเก็บข้อมูลกระทำเป็น 3 ชุดโดยในแต่ละชุดปรับให้ผลบวกของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B มีค่าคงที่เป็น 6 8 และ 10 โวลท์ และเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าในแต่ละชุดทีละ 0.5 โวลท์ โดยเริ่มจากแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A เท่ากับ 1.5 โวลท์ จนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ B เท่ากับ 1.5 โวลท์ การเก็บข้อมูลแต่ละครั้งใช้เวลา 5 นาที

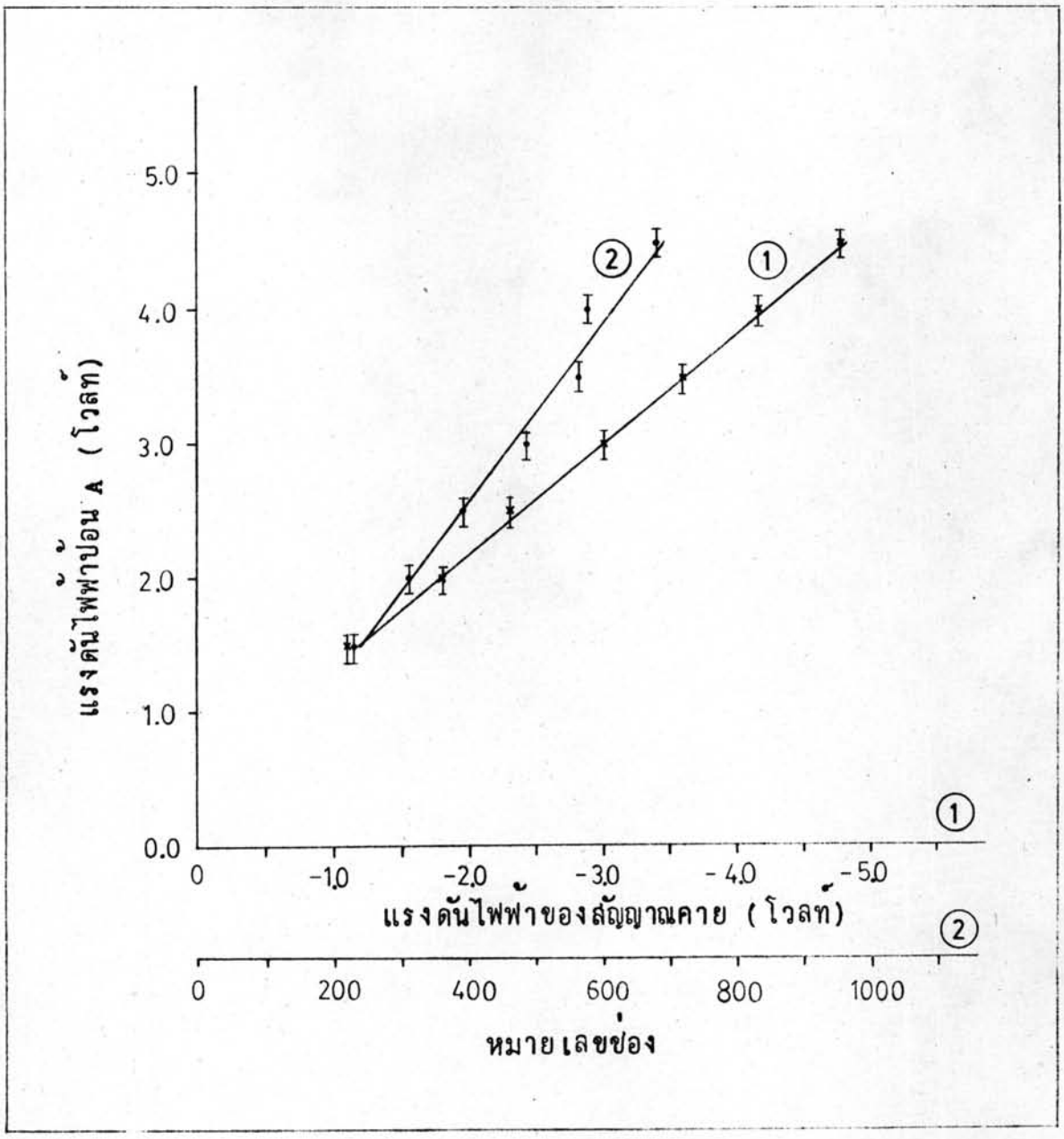
5.3.3 ผลการทดลอง รูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่างของกราฟอันหนึ่งซึ่งได้จากเครื่องวิเคราะห์เมื่อผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 10 โวลท์ และแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 3 และ 7 โวลท์ ตามลำดับ ตารางที่ 5.2 5.3 และ 5.4 แสดงข้อมูลเมื่อผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 6 8 และ 10 โวลท์ ตามลำดับ รูปที่ 5.9 5.10 และ 5.11 เป็นกราฟแสดงสภาพเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ เมื่อผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 6 8 และ 10 โวลท์ ตามลำดับ



รูปที่ 5.8 กราฟเมื่อแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 3 และ 7 โวลท์ ตามลำดับ

แรงดันไฟฟ้าป้อน A (โวลท์)	แรงดันไฟฟ้าป้อน B (โวลท์)	แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณคาย (โวลท์)	หมายเลขช่อง
1.5	4.5	-1.1	229
2.0	4.0	-1.8	313
2.5	3.5	-2.3	396
3.0	3.0	-3.0	490
3.5	2.5	-3.6	572
4.0	2.0	-4.2	582
4.5	1.5	-4.8	685

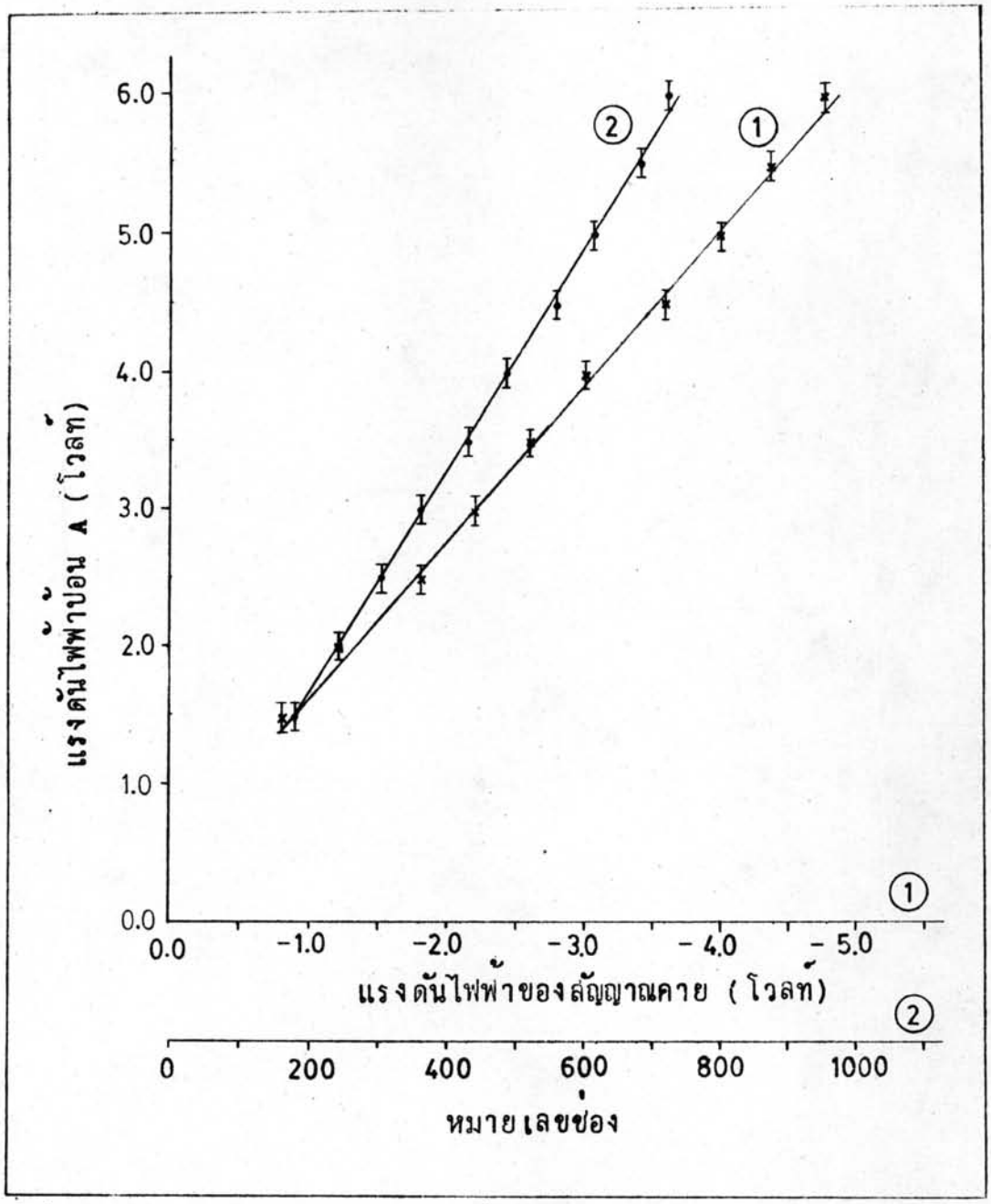
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลเมื่อผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 6 โวลท์



รูปที่ 5.9 สภาพเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ เมื่อผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 6 โวลท์

แรงดันไฟฟ้าป้อน A (โวลท์)	แรงดันไฟฟ้าป้อน B (โวลท์)	แรงดันไฟฟ้าของสัญญาคาย (โวลท์)	หมายเลขช่อง
1.5	6.5	-0.8	183
2.0	6.0	-1.2	246
2.5	5.5	-1.8	305
3.0	5.0	-2.2	365
3.5	4.5	-2.6	429
4.0	4.0	-3.0	490
4.5	3.5	-3.6	555
5.0	3.0	-4.0	622
5.5	2.5	-4.4	681
6.0	2.0	-4.8	723

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลเมื่อผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 8 โวลท์

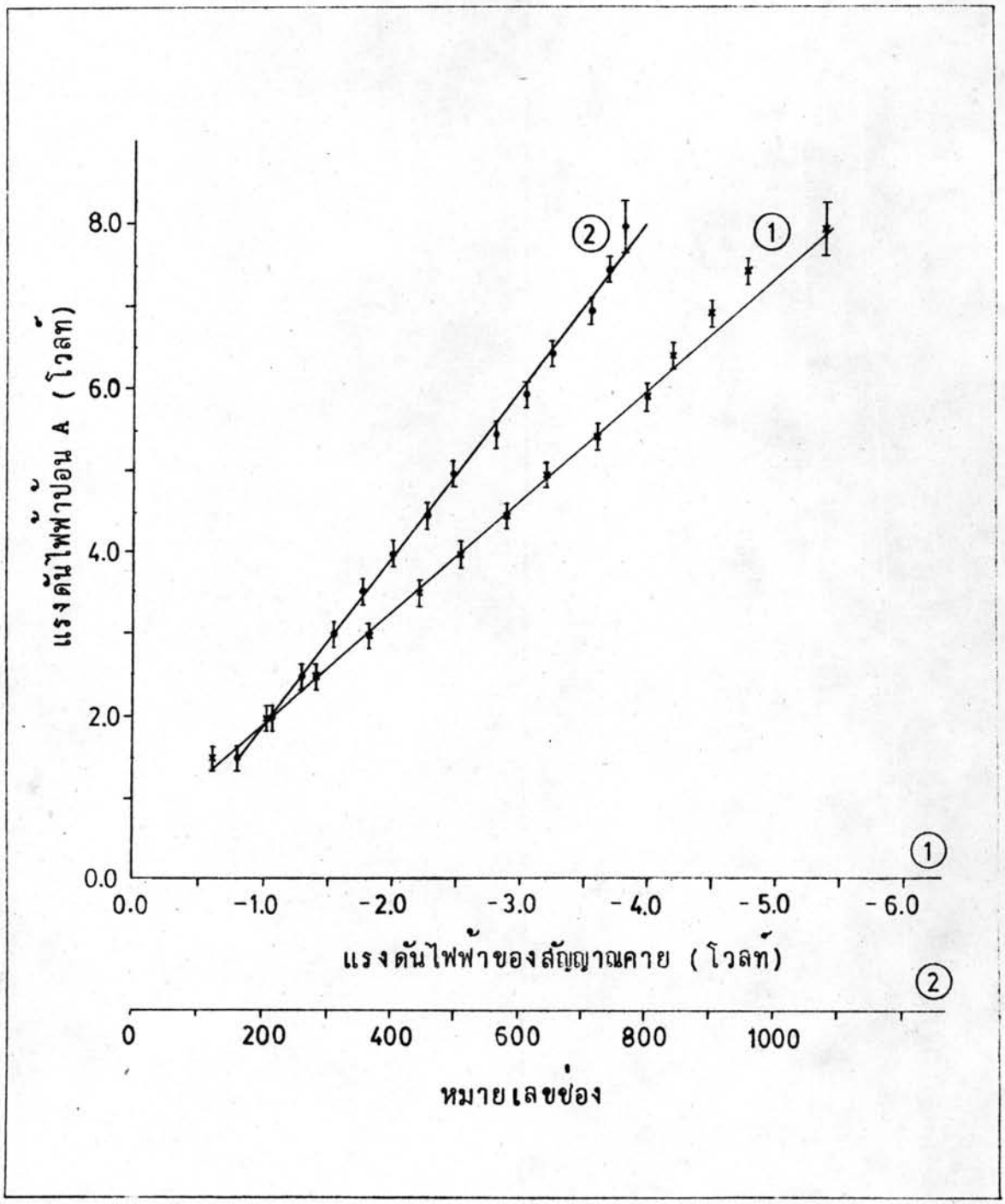


รูปที่ 5.10 สภาพเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชัน แฟรกเมนต์เมื่อผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 8 โวลท์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แรงดันไฟฟ้าป้อนA (โวลท์)	แรงดันไฟฟ้าป้อนB (โวลท์)	แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณคาย (โวลท์)	หมายเลขช่อง
1.5	8.5	-0.6	164
2.0	8.0	-1.0	214
2.5	7.5	-1.4	262
3.0	7.0	-1.8	312
3.5	6.5	-2.2	356
4.0	6.0	-2.5	399
4.5	5.5	-2.9	453
5.0	5.0	-3.2	501
5.5	4.5	-3.6	557
6.0	4.0	-4.0	606
6.5	3.5	-4.2	650
7.0	3.0	-4.5	704
7.5	2.5	-4.8	743
8.0	2.0	-5.4	770

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลเมื่อผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 10 โวลท์



รูปที่ 5.11 สภาพเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ เมื่อผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และ B เท่ากับ 10 โวลท์

5.4 การแจกแจงพลังงานจลน์ของพิชชันแฟรกเมนต์

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการแจกแจงพลังงานจลน์ของพิชชันแฟรกเมนต์จากหัววัดแต่ละหัว และทำการปรับกำลังขยายของเครื่องขยายทั้งสองเพื่อให้ยอดของกราฟการแจกแจงพลังงานจลน์ของพิชชันแฟรกเมนต์จากหัววัดทั้งสองอยู่ ณ ตำแหน่งหมายเลขช่องของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณใกล้เคียงกันมากที่สุดก่อนที่จะป้อนสัญญาณทั้งสองเข้าสู่อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ต่อไป

5.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ก. แหล่งกำเนิดพิชชัน คือ คาลิฟอร์เนียม-252

ข. ห้องสูญญากาศ ปั๊มป์สูญญากาศ ถ้วยดิวาร์และไนโตรเจนเหลว

ค. หัววัดพิชชันแฟรกเมนต์ หมายเลข 17-174 E และ 17-441J จำนวน 2 อัน

ง. เครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้าแก่หัววัดพิชชันแฟรกเมนต์ หมายเลข 428 จำนวน 1 เครื่อง

จ. เครื่องขยายล่วงหน้า หมายเลข 109A และ 1406 จำนวน 2 เครื่อง

ฉ. เครื่องขยาย หมายเลข 2010 จำนวน 2 เครื่อง

ช. เครื่องขยายหน่วงเหนี่ยว หมายเลข 1457 จำนวน 2 เครื่อง

ซ. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง

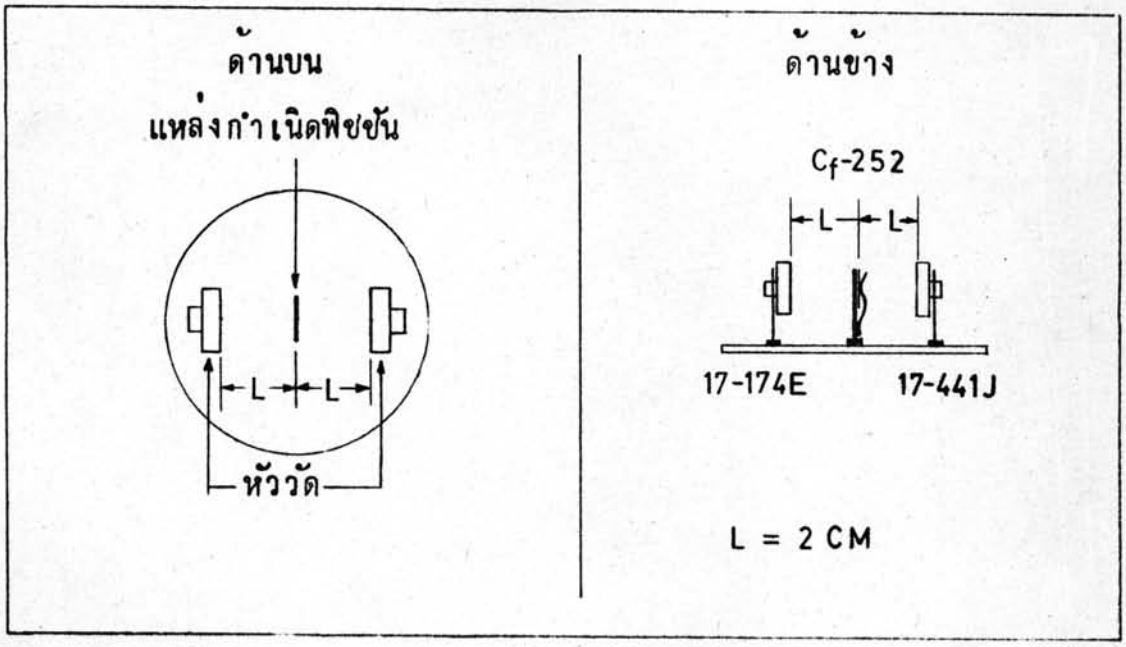
ฌ. ออสซิลโลสโคป

5.4.2 ขั้นตอนในการทดลอง

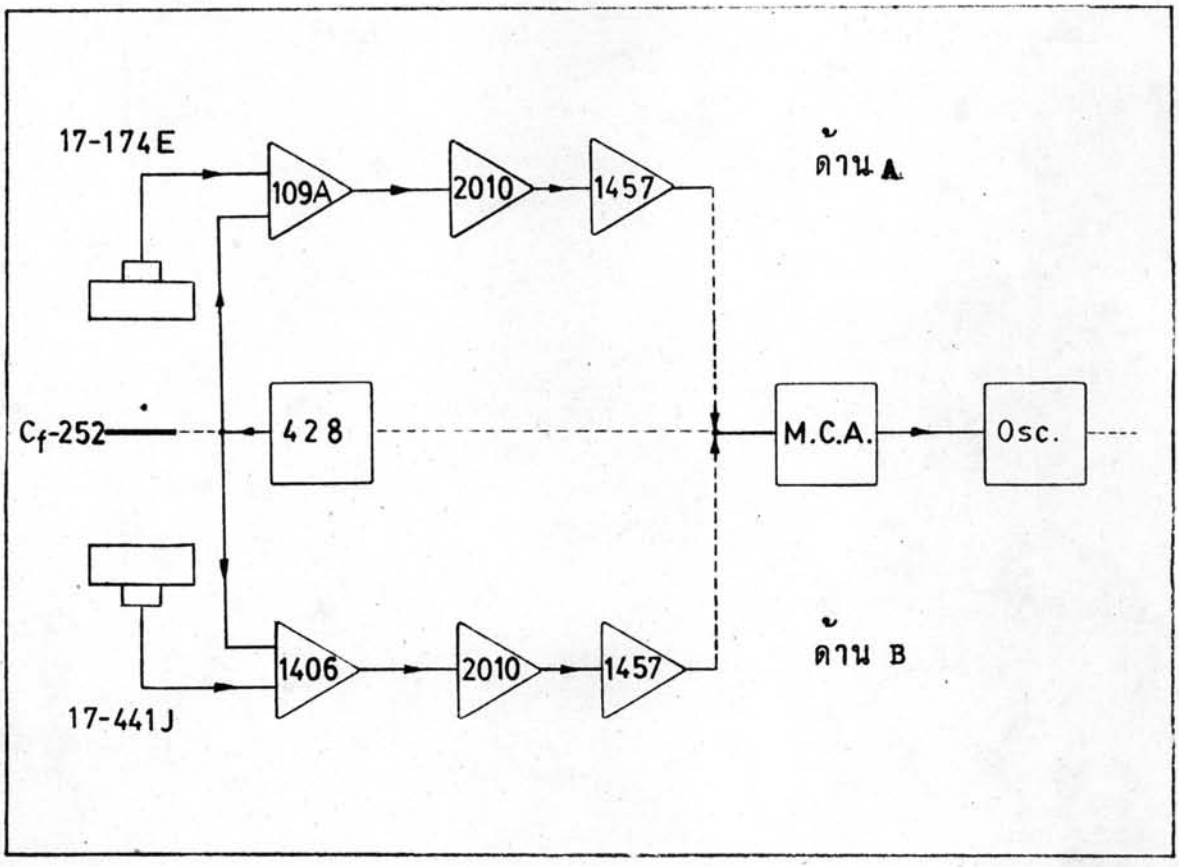
ก. จัดตั้งแหล่งกำเนิดฟิชชัน หัววัดฟิชชันแฟรกเมนต์ทั้งสอง ภายในห้องสูญญากาศ โดยให้ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดฟิชชันแฟรกเมนต์กับหัววัดทั้งสองเท่ากับ 2 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.12

ข. จัดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็น 2 ด้าน ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 5.13

ค. เติมไนโตรเจนเหลวลงในถ้วยดิวาร์จนเต็ม และตลอดการทดลองต้องคอยเติมไนโตรเจนเหลวอยู่เสมอ



รูปที่ 5.12 แสดงการจัดตั้งแหล่งกำเนิดฟิชชัน หัววัดฟิชชันแฟรกเมนต์ภายในห้องสูญญากาศ



รูปที่ 5.13 แสดงแผนผังการจัดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อศึกษาการแจกแจงพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์

ง. ปิดสวิทช์ของปั๊มปั่นสูญญากาศเพื่อให้ปั๊มปั่นสูญญากาศทำงานและดูดอากาศออกจากห้องสูญญากาศ เดินเครื่องทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง

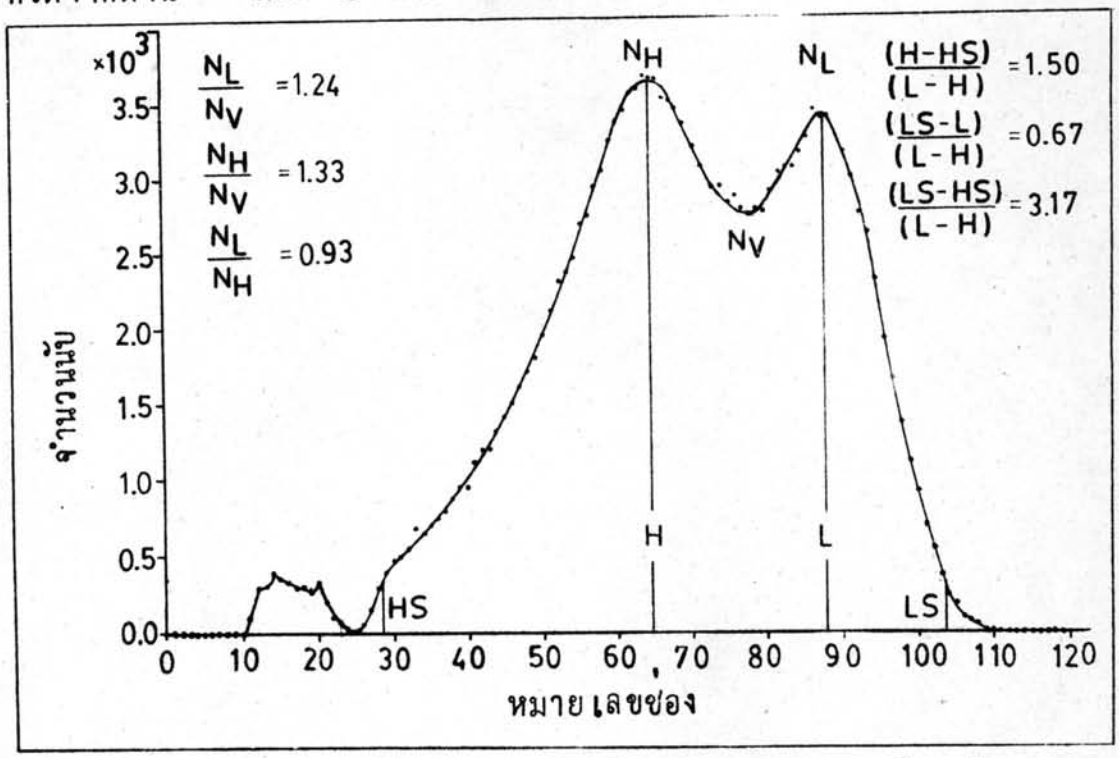
จ. ปรับอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 5.2.2 ในขั้นตอนนี้ปรับเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้าแก่หัววัดฟิชชันแฟรกเมนต์ ให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

ฉ. ปิดสวิทช์เพื่อจ่ายกำลังให้แก่อุปกรณ์ต่าง ๆ ค่อย ๆ เพิ่มแรงดันไฟฟ้าแก่หัววัดฟิชชันแฟรกเมนต์ทีละน้อย ๆ จนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าที่หัววัดแต่ละหัวต้องการ

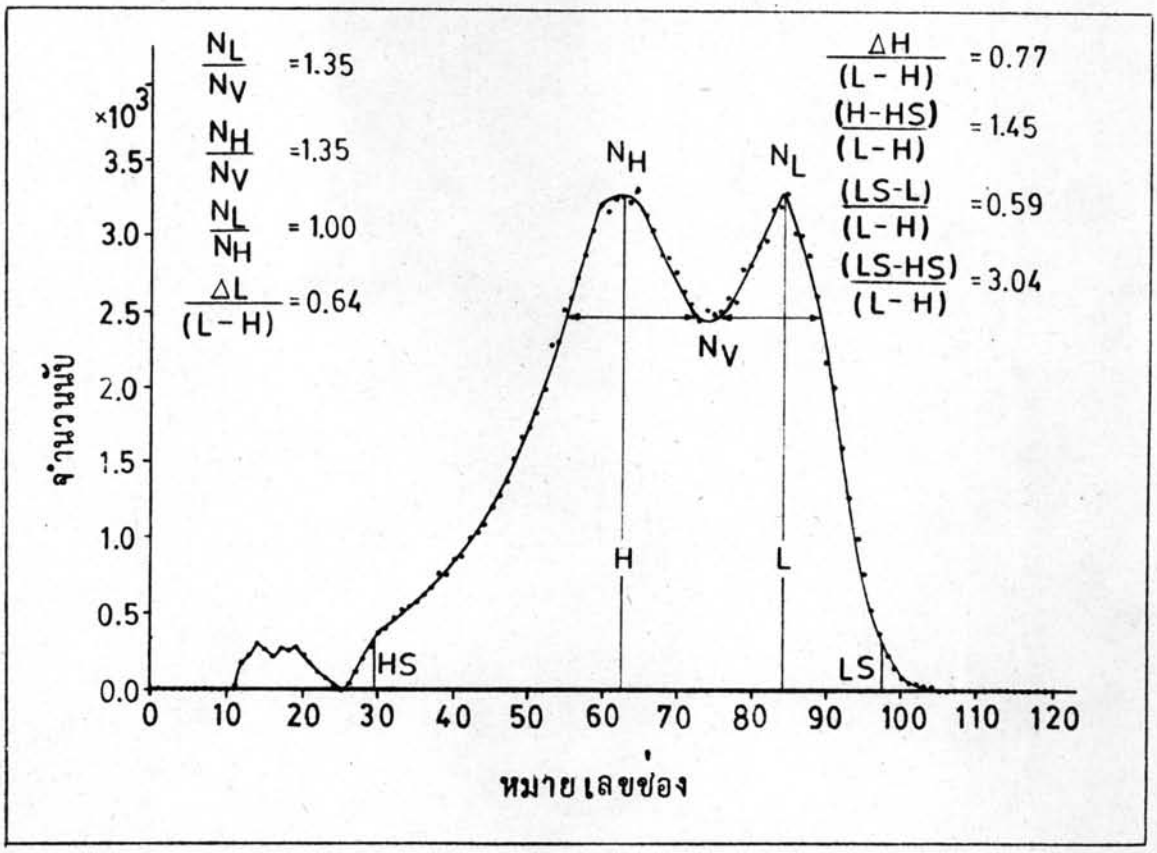
ช. ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลจากด้าน A และ B ด้านละ 50 ชั่วโมง

ช. เมื่อได้ข้อมูลทั้ง 2 ด้านจากขั้นตอน ช. แล้ว นำไปเขียนกราฟการแจกแจงพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์เพื่อดูว่ายอดของกราฟทั้งสองอยู่ ณ ตำแหน่งหมายเลขช่องเดียวกันหรือไม่ ถ้ายังไม่อยู่ ณ ตำแหน่งเดียวกันก็ทำการปรับกำลังขยายของเครื่องขยายเครื่องใดเครื่องหนึ่งแล้วทำการทดลองใหม่จนกว่าจะได้กำลังขยายที่ต้องการ การเขียนกราฟกระทำได้โดยการลดจำนวนช่องของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณจาก 1024 ช่อง เป็น 128 ช่อง โดยการรวมจำนวนนับ (**Number of counts**) ใน 8 ช่องแล้วให้ถือเป็น 1 ช่อง ทั้งนี้เพื่อให้จำนวนนับในแต่ละช่องมีค่ามากขึ้น

5.4.3 ผลการทดลอง การแจกแจงพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์และพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกราฟ แสดงในรูปที่ 5.14 และ 5.15 ซึ่งเป็นกราฟที่ได้จากด้าน A และ B ตามลำดับ



รูปที่ 5.14 แสดงการแจกแจงพลังงานจลน์ของฟิชชันแฟรกเมนต์ของด้าน A



รูปที่ 5.15 แสดงการแจกแจงพลังงานจลน์ของพิชชันแฟรกเมนต์ของด้าน B

5.5 การแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดลองเพื่อดูลักษณะการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

5.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองหัวข้อนี้เหมือนกับหัวข้อที่ 5.4 ทุกประการ อุปกรณ์ที่เพิ่มเติมเข้ามาคืออุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

5.5.2 ขั้นตอนในการทดลอง

ก. ดำเนินการทดลองต่อจากการทดลองในหัวข้อที่ 5.4 และจัดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในแผนผังรูปที่ 5.16 โดยไม่ต้องเปิดสวิทช์ใด ๆ ทั้งสิ้น

และปรับให้สัญญาณคายของเครื่องขยายหน่วงเหนี่ยวมีขั้วเป็นบวก

ข. ปิดสวิทช์เพื่อจ่ายกำลังให้แก่อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์

ค. ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล การเก็บข้อมูลใช้เวลาทั้งหมด 100 ชั่วโมง โดยจดบันทึกข้อมูลวันละ 1 ครั้ง

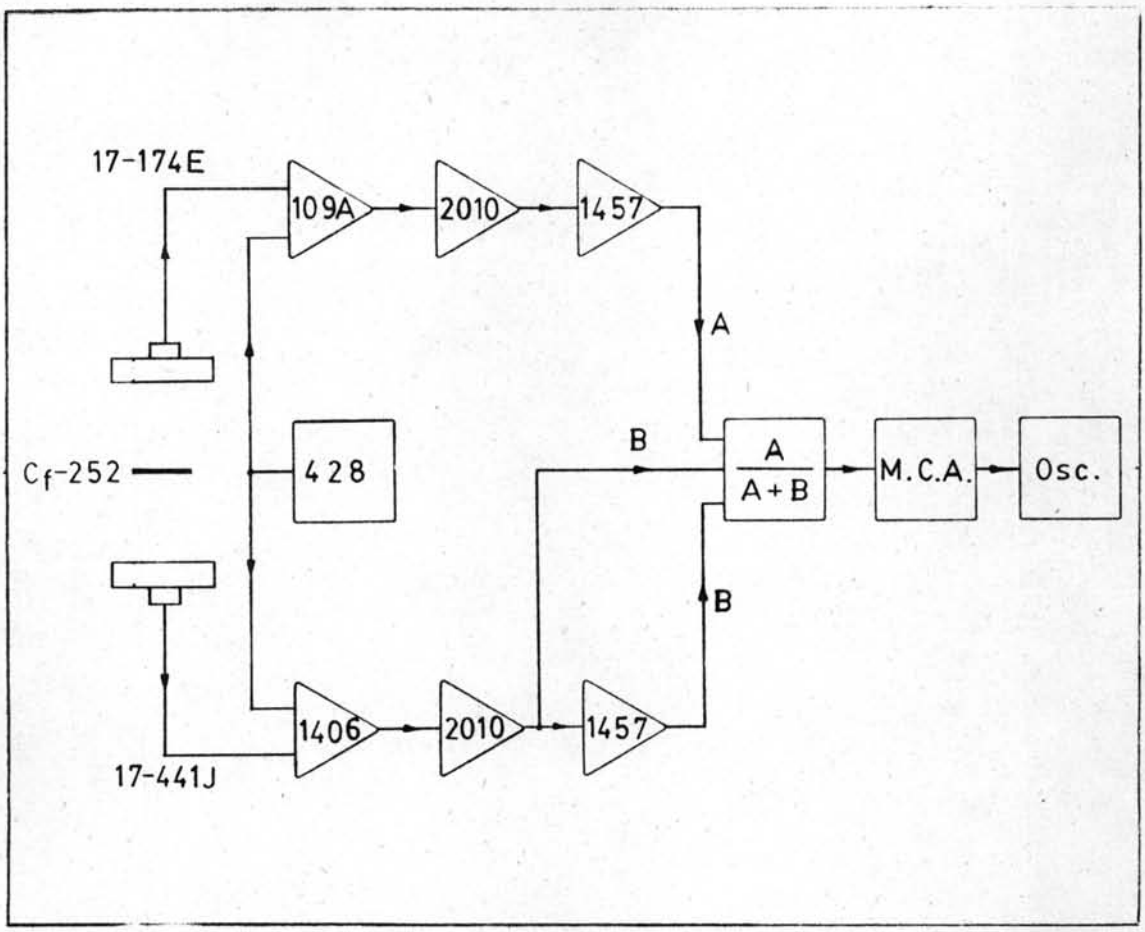
ง. เมื่อได้ข้อมูลตามต้องการแล้ว ค่อย ๆ ลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หัววัดทั้งสองอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเป็น 0 โวลท์

จ. เปิดสวิทช์เพื่องดจ่ายกำลังให้แก่อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งปั๊มปสูญญากาศด้วย

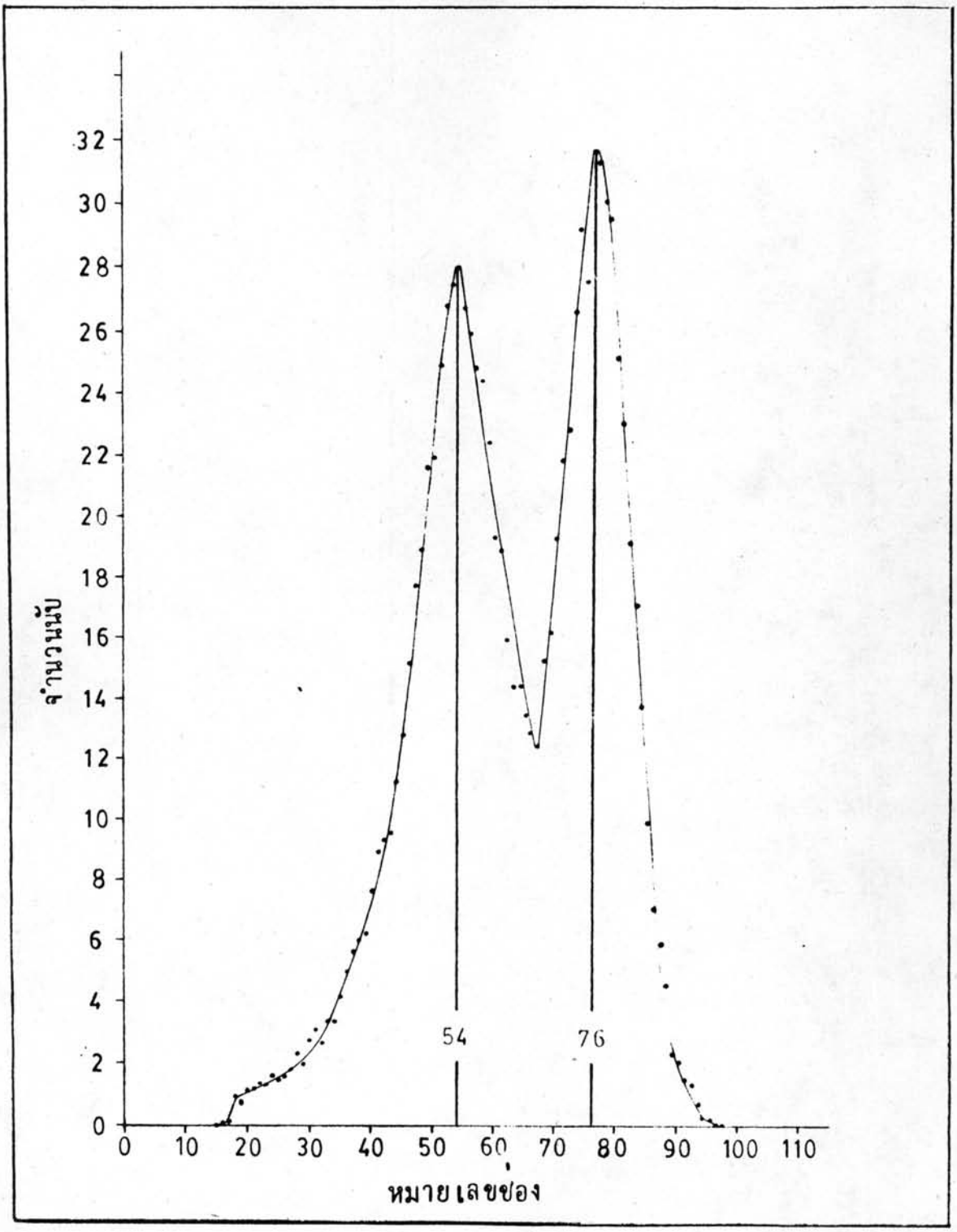
ฉ. ค่อย ๆ เปิดลิ้นแบบปลายเข็มเพื่อให้อากาศเข้าสู่ห้องสูญญากาศอย่างช้า ๆ จนกระทั่งความดันของอากาศภายในและภายนอกห้องสูญญากาศเท่ากัน

ช. เก็บแหล่งกำเนิดพิชชัน หัววัดพิชชันแฟรกเมนต์ และอุปกรณ์อื่น ๆ เข้าที่ให้เรียบร้อย

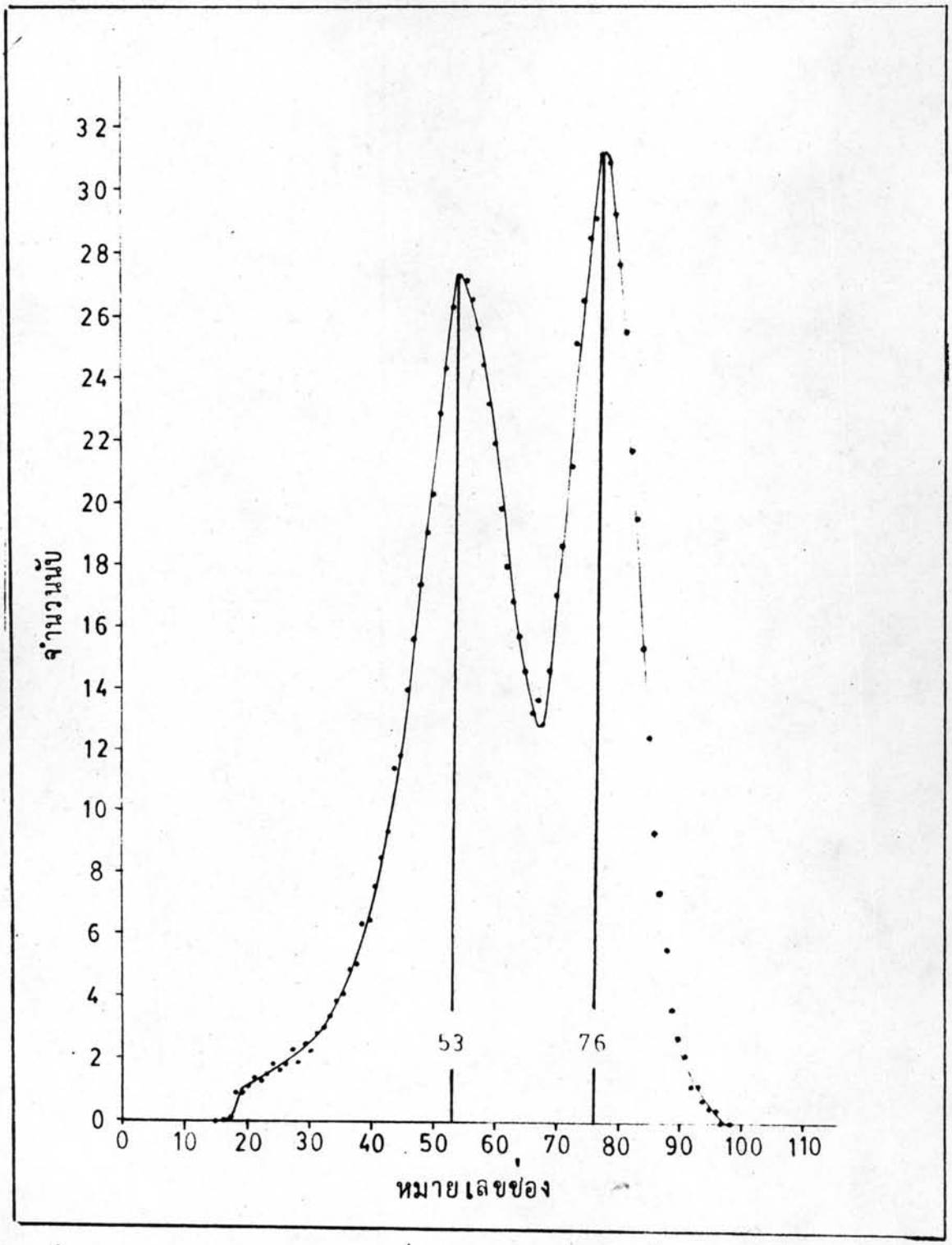
5.5.3 ผลการทดลอง ข้อมูลที่ได้ในแต่ละวันเป็นข้อมูลทบต้น เช่น ข้อมูลที่ได้ในวันที่สามจะหมายถึงข้อมูลที่เก็บมาเป็นเวลา 3 วัน ดังนั้นเมื่อต้องการเฉพาะข้อมูลของวันที่สามจะต้องเอาข้อมูลของ 2 วันแรกมาลบออกจากข้อมูลที่ได้ในวันที่สาม สำหรับข้อมูลเฉพาะของวันอื่น ๆ ก็ปฏิบัติดังกล่าวแล้วเช่นกัน เมื่อนำข้อมูลเฉพาะของแต่ละวันมาเขียนกราฟก็จะได้กราฟการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์เฉพาะของแต่ละวันซึ่งจะทำให้เราทราบได้ว่าในแต่ละวันการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์มีการเปลี่ยนแปลงบ้างหรือไม่ รูปที่ 5.17 ถึงรูปที่ 5.21 เป็นกราฟแสดงการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์เฉพาะในแต่ละวัน ส่วนรูปที่ 5.22 เป็นกราฟแสดงการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์เมื่อเก็บข้อมูลเป็นเวลา 100 ชั่วโมง



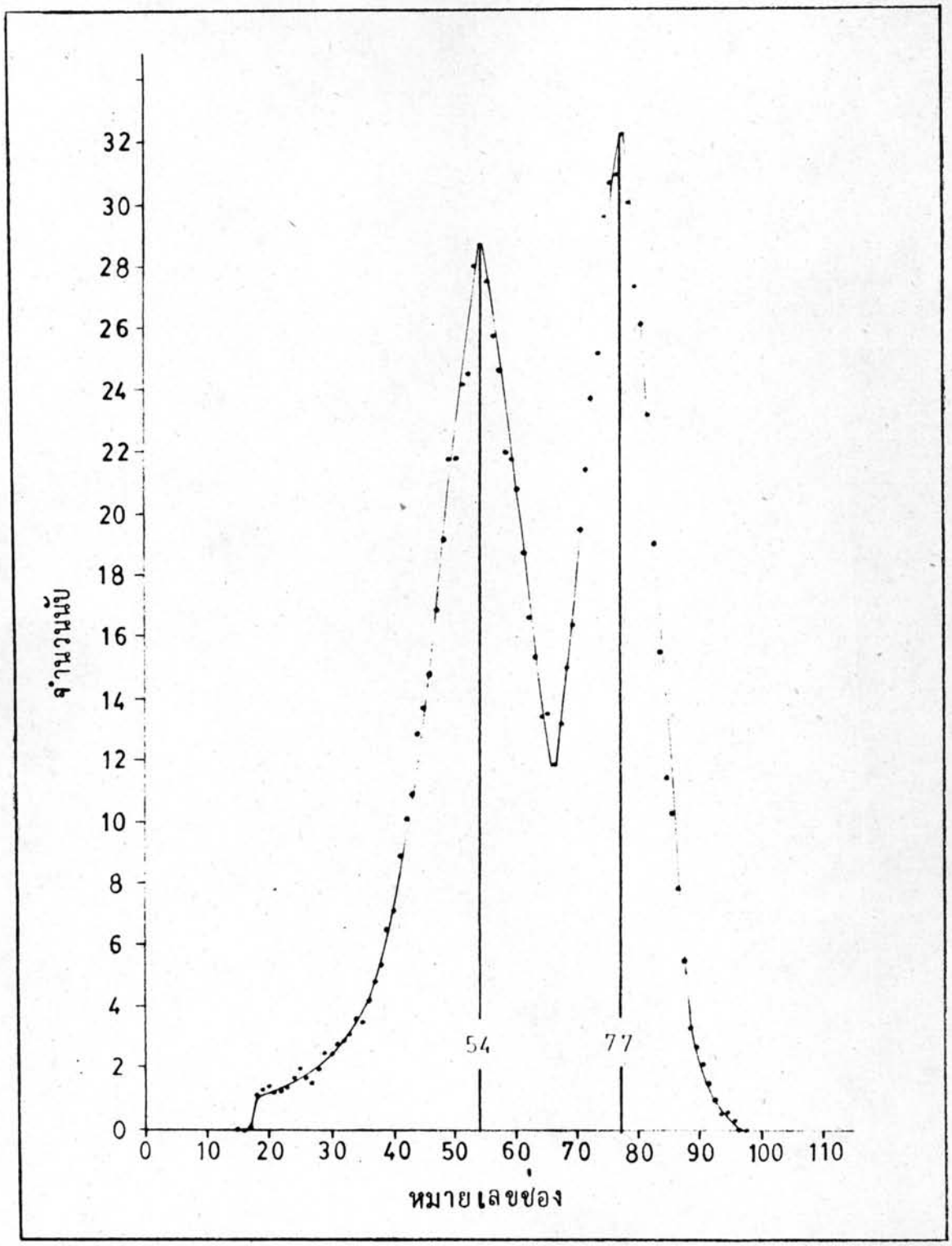
รูปที่ 5.16 แผนผังการจัดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อศึกษาการแจกแจงมวลของฟิชชัน แฟรกเมนต์



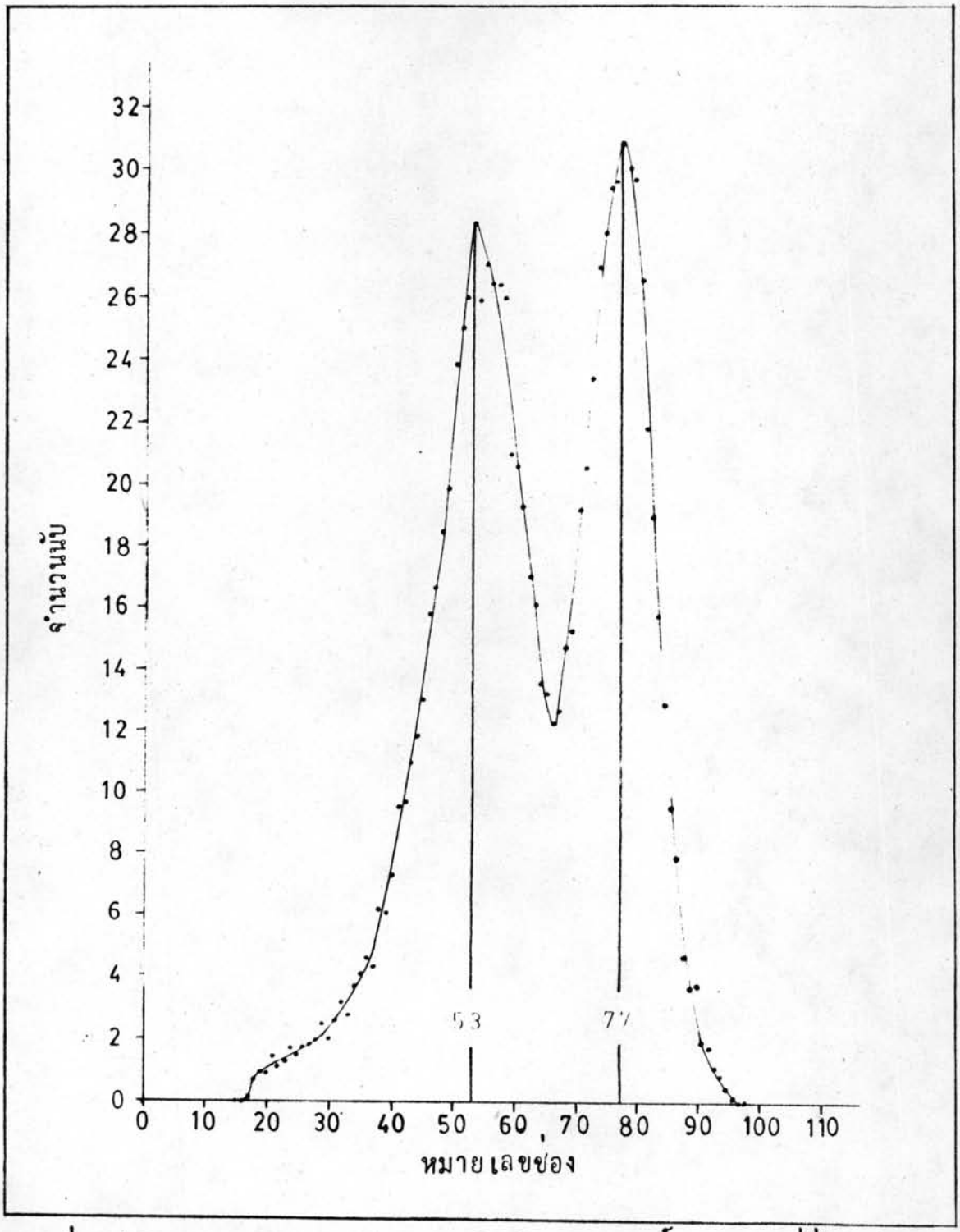
รูปที่ 5.17 กราฟการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ เฉพาะวันที่หนึ่ง



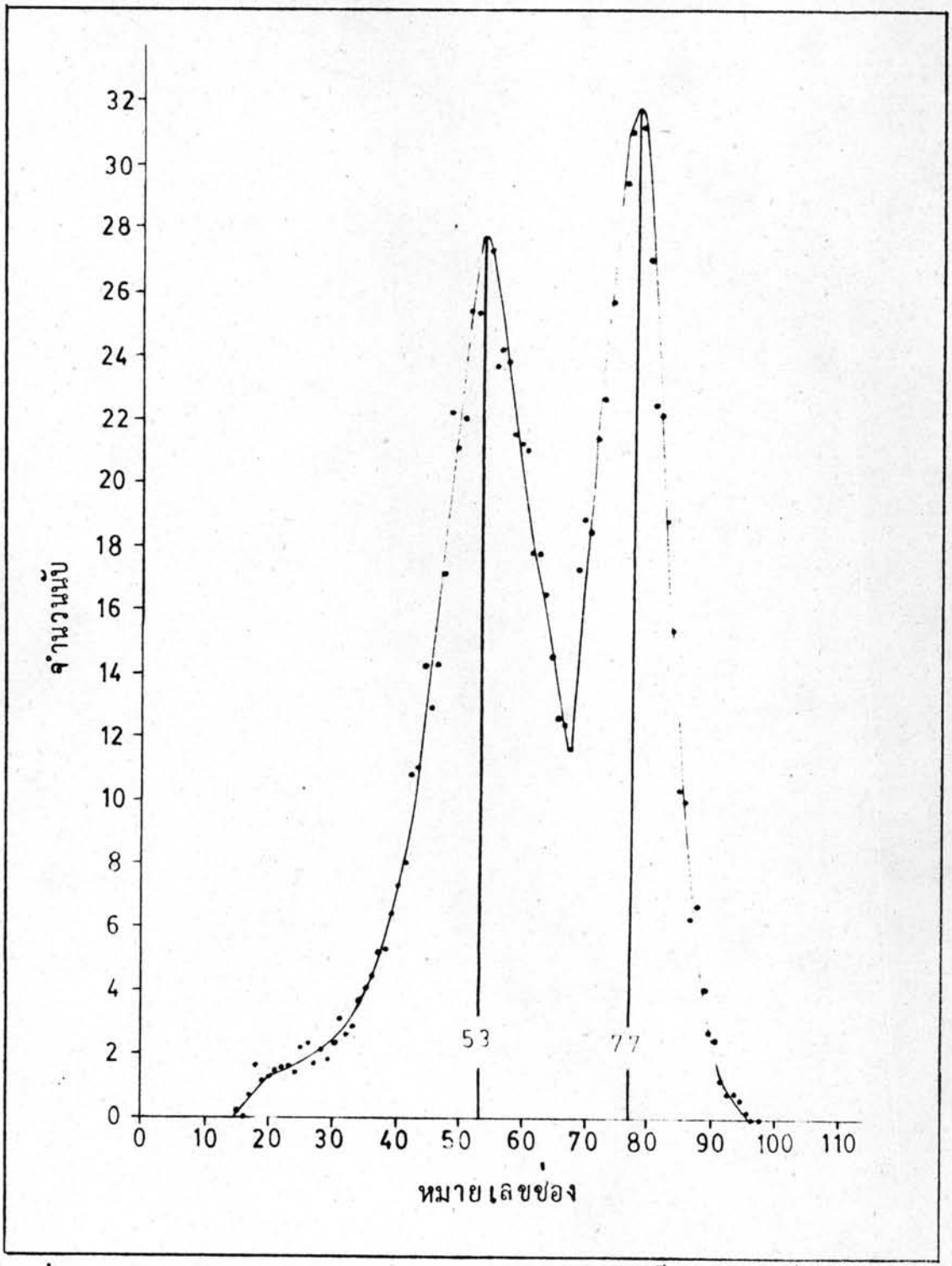
รูปที่ 5.18 กราฟการแจกแจงมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ เฉพาะวันที่สอง



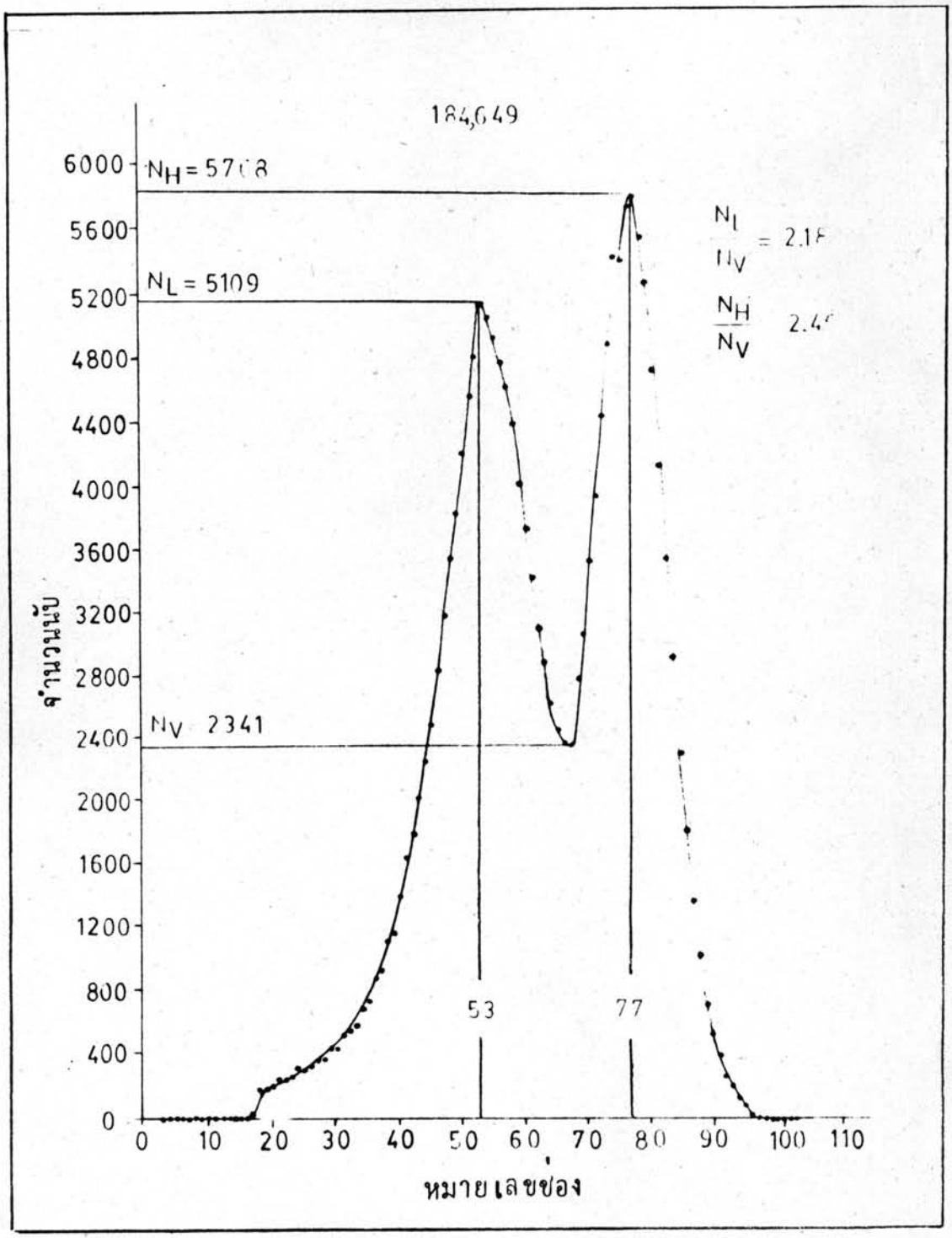
รูปที่ 5.19 กราฟการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ เฉพาะวันที่สาม



รูปที่ 5.20 กราฟการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ เฉพาะวันที่สี่



รูปที่ 5.21 กราฟการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ เฉพาะวันที่ห้า



รูปที่ 5.22 กราฟการแจกแจงมวลของฟิชชันแฟรกเมนต์ รวมทั้ง 5 วัน

5.6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากรูปที่ 5.22 ซึ่งเป็นกราฟการแจกแจงมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ จะเห็นว่ายอดทั้งสองของกราฟสูงไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างยอดต่อห้วง (Valley)มี2 ค่า คือ N_L/N_V และ N_H/N_V เท่ากับ 2.18 และ 2.46 ตามลำดับ การทดลองของดับบิล ที จอยเนอร์ (W.T Joyner) และคณะ[5] ได้ค่าอัตราส่วนระหว่างยอดต่อห้วงประมาณ 3.5 ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากรูปที่ 5.14 และ 5.15 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการแจกแจงพลังงานจลน์ของพิชชันแฟรกเมนต์จากด้าน A และ B ตามลำดับ จะเห็นว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกราฟทั้งสองคลาดเคลื่อนไปจากค่าซึ่งเป็นที่ยอมรับมาก ความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ อาจจะเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

5.6.1 แหล่งกำเนิดพิชชัน เนื่องจากพิชชันแฟรกเมนต์เกิดขึ้นเป็นคู่และเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามทะลุผ่านเยื่อทองคำบาง ๆ ซึ่งเคลือบอยู่ด้านหน้าและนิเกิลซึ่งทำหน้าที่เป็นฐานอยู่ด้านหลัง ทำให้พิชชันแฟรกเมนต์ทั้งคู่สูญเสียพลังงานจลน์ไม่เท่ากัน เราสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการปรับกำลังขยายของเครื่องขยายทั้งสอง ซึ่งทำให้ต้องเสียเวลาไปมาก

5.6.2 หัววัดพิชชันแฟรกเมนต์ เมื่อทำการทดลองติดต่อกันเป็นเวลาหลายวัน จะทำให้หัววัดค่อย ๆ เสื่อมคุณภาพซึ่งจะทำให้สัญญาณจากหัววัดค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้ไอน้ำมันจากปั๊มปั๊สูญญากาศอาจจะทำให้หัววัดเสื่อมคุณภาพเร็วขึ้น

5.6.3 เครื่องขยายล่วงหน้า ในการทดลองเราใช้เครื่องขยายล่วงหน้าจำนวน 2 เครื่อง ซึ่งมีหมายเลขต่างกันทำให้กำลังขยายไม่เท่ากัน การแก้ปัญหานี้กระทำได้โดยการปรับกำลังขยายของเครื่องขยายทั้งสองซึ่งทำให้ต้องเสียเวลามาก

5.6.4 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง จากรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นกราฟแสดงสภาพเชิงเส้นของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณ จะเห็นว่าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะทำงานได้ดีเมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนอยู่ในช่วง -1.5 ถึง -6 โวลท์ เท่านั้น แต่ในการทดลองเกี่ยวกับการแจกแจงพลังงานจลน์และมวลของพิชชันแฟรกเมนต์นั้น แรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณจะมีค่าอยู่ในช่วง -0.5 ถึงประมาณ 6 โวลท์

5.6.5 อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ จากรูปที่ 5.9, 5.10และ 5.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงสภาพเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์ จะเห็นว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้ารวมของสัญญาณป้อน A และ B มีค่าเท่ากับ 8 โวลท์ อุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์จะมีสภาพเชิงเส้นดีที่สุด ดังนั้นในการทดลองจึงต้องปรับกำลังขยายของเครื่องขยายทั้งสองให้ผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณ A และB ซึ่งจะป้อนเข้าอุปกรณ์อิเลกโทรนิคสำหรับวัดมวลของพิชชันแฟรกเมนต์มีค่าประมาณ 8 โวลท์

5.6.6 สภาพแวดล้อม ได้แก่ ความชื้น อุณหภูมิ ภายในห้องทดลอง และเหตุสุดวิสัย เช่น ไฟฟ้าดับหรือไฟตกซึ่งทำให้ต้องเสียเวลาเริ่มต้นทดลองใหม่

ในการทดลองนี้ ถ้าจะทำให้ได้ผลดีกว่านี้ จะต้องใช้แหล่งกำเนิดพิชชันที่มีกัมมันตภาพแรงกว่านี้และบางมาก ๆ เครื่องขยายล่วงหน้าทั้งสองเครื่องจะต้องเป็นหมายเลขเดียวกัน จึงจะทำให้การเก็บข้อมูลต่าง ๆ ใช้เวลาน้อยลง นอกจากนี้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องจะต้องมีสมรรถภาพสูงกว่านี้

ภาคผนวก ก.

เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล

ก.1 บทนำ

เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลเป็นเครื่องขยายชนิดหนึ่งซึ่งถูกนำไปใช้ในงานด้านต่าง ๆ ทางอิเลกโทรนิคกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีกำลังขยายวงเปิด (Open-loop gain) สูงมาก แต่เมื่อนำไปออกแบบเป็นวงจรต่าง ๆ กำลังขยายวงปิด (Closed-loop gain) จะมีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังขยายวงเปิดของเครื่องขยาย การจะทำให้กำลังขยายวงปิดมีค่าต่ำกว่ากำลังขยายวงเปิดมาก ๆ ได้จะต้องใช้สัญญาณป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) ที่มีค่ามาก ด้วยเหตุนี้ลักษณะของวงจรจึงขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ซึ่งประกอบเป็นวงจรป้อนกลับเกือบจะโดยสิ้นเชิง โดยปกติอุปกรณ์ซึ่งประกอบเป็นวงจรป้อนกลับเป็นพวกพาสสีฟ (Passive element) ดังนั้นวงจรที่ใช้เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลจึงมีเสถียรภาพสูงมาก

รูปที่ ก.1 แสดงสัญลักษณ์ของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันซึ่งเป็นรูปสามเหลี่ยมมีขาป้อน 2 ขา และขาคาย 1 ขา ขาป้อนอันหนึ่งเรียกว่าขาป้อนหกกลับกำกับด้วยเครื่องหมายลบ (-) อีกขาหนึ่งเรียกว่าขาป้อนไม่หกกลับกำกับด้วยเครื่องหมายบวก (+) เครื่องหมายลบและบวกแสดงความหมายดังนี้ ถ้าแรงดันไฟฟ้าป้อน e_1 เปลี่ยนแปลงในขณะที่ e_2 คงที่ แรงดันไฟฟ้าคาย e_3 จะมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงกันข้ามกับ e_1 ถ้า e_2 เปลี่ยนแปลงในขณะที่ e_1 คงที่ e_3 จะเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกับ e_2 ตารางที่ ก.1 แสดงวงจรซึ่งใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่วงจรเปรียบเทียบ วงจรขยายและวงจรขยายรวม

ก.2 <u>เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในอุดมคติ</u>

เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในอุดมคติจะมีสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก.2.1 กำลังขยายเท่ากับอนันต์

ก.2.2 แถบกว้างความถี่เท่ากับอนันต์ (Infinite bandwidth)

ก.2.3 อิมพีแดนซ์ป้อนระหว่างขาป้อนทั้งสองเท่ากับอนันต์

ก.2.4 อิมพีแดนซ์ป้อนระหว่างขาป้อนแต่ละขากับดินเท่ากับอนันต์

ก.2.5 สามารถให้กระแสไฟฟ้าคายได้ถึงอนันต์

ก.2.6 อิมพีแดนซ์คายเท่ากับศูนย์

ก.2.7 แรงดันไฟฟ้าป้อนชดเชย (Input voltage offset) เท่ากับศูนย์

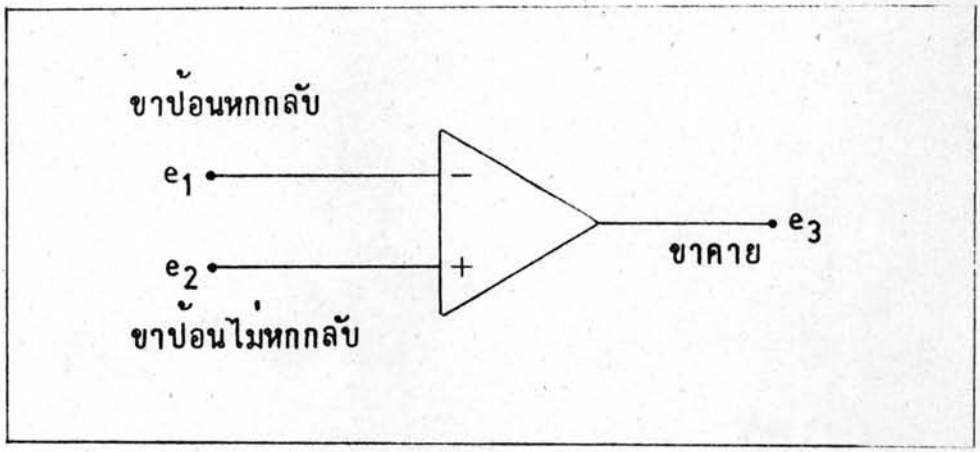
ก.2.8 กระแสไฟฟ้าป้อนเท่ากับศูนย์

ก.2.9 คอมมอนโมดรีเจคชัน (Common-mode rejection) เท่ากับอนันต์

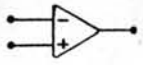
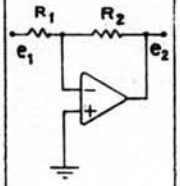
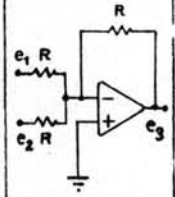
ก.2.10 สมบัติทั้งเก้าข้อข้างบนนี้เป็นจริงทุก ๆ อุณหภูมิ

จะเห็นได้ว่าเราไม่สามารถสร้างเครื่องขยายที่มีสมบัติดังกล่าวข้างบนนี้ได้ ในการออกแบบวงจรต่าง ๆ เราสมมุติว่าเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลมีสมบัติทั้งสิบข้อครบถ้วน ในการใช้งานจริง ๆ สมบัติของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล จะแตกต่างออกไปจากสมบัติของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในอุดมคติบ้างเล็กน้อย

จากสมบัติทั้งสิบข้อของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในอุดมคติ เราสามารถสรุปสาระสำคัญเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์วงจร ดังต่อไปนี้



รูปที่ ก.1 สัญลักษณ์ของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล

ชื่อวงจร	วงจร	กำลังขยาย	R_{in}	R_{out}	อื่น ๆ
วงจรเปรียบเทียบ		กำลังขยายวงเปิด	10kΩ - 1kΩ	1kΩ-10kΩ	
วงจรเครื่องขยาย		$\frac{e_2}{e_1} = \frac{-R_2}{R_1}$	R_1	ต่ำ	กลับเฟส
วงจรเครื่องขยายรวม		$e_3 = -(e_1+e_2)$	R	ต่ำ	

ตารางที่ ก.1 แสดงวงจรและสมบัติต่าง ๆ

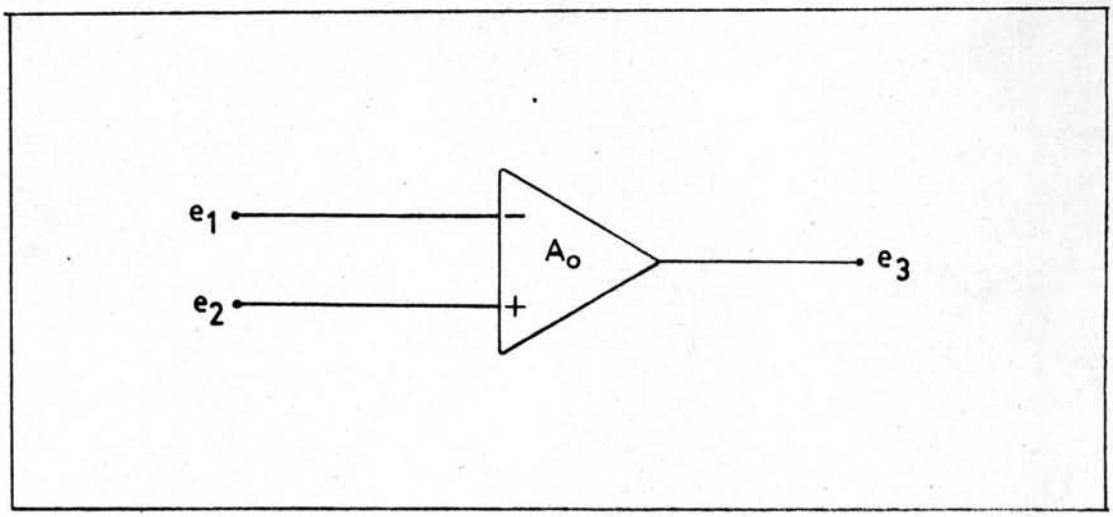
1. เนื่องจากเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลมีค่าอิมพีแดนซ์ป้อนเป็นอนันต์ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าป้อนเข้าขาป้อนจะต้องไหลในเส้นทางอื่นโดยจะไม่ไหลเข้าเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลเลย

2. เนื่องจากกำลังขยายของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นความต่างศักดิ์ไฟฟ้าระหว่างขาป้อนทั้งสองของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลจึงมีค่าเป็นศูนย์

3. ผลอันเกิดจากความถี่และภาระ (Load) สามารถตัดทิ้งได้และเมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนมีค่าเป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าคายจะมีค่าเป็นศูนย์ด้วย

ก.3 <u>การวิเคราะห์วงจรต่าง ๆ โดยใช้สมบัติของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในอุดมคติ</u>

ก.3.1 <u>วงจรเปรียบเทียบ</u> เป็นวงจรที่ใช้ในการเปรียบเทียบสัญญาณสองสัญญาณว่าสัญญาณใดมีแรงดันไฟฟ้ามากกว่าหรือน้อยกว่า วงจรเปรียบเทียบประกอบด้วยเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลเพียงเครื่องเดียวและไม่มีวงจรป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ ก.2 กำลังขยายของวงจรมีค่าเท่ากับกำลังขยายวงเปิด A_o



รูปที่ ก.2 วงจรเปรียบเทียบ

e_1 และ e_2 เป็นแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าขาลบและบวกตามลำดับ e_3 เป็นสัญญาณคาย เมื่อ e_1 และ e_2 มีค่าเท่ากัน e_3 จะมีค่าเป็นศูนย์ ถ้า e_1 มีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับ e_2 e_3 จะมีค่าเป็นลบ แต่ถ้า e_1 มีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับ e_2 e_3 จะมีค่าเป็นบวก ดังนั้นถ้าให้ e_2 เป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง e_3 จะเป็นตัวแสดงให้ทราบว่า e_1 มีค่ามากหรือน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

ก.4 <u>เครื่องขยายแบบหกกลับ</u>

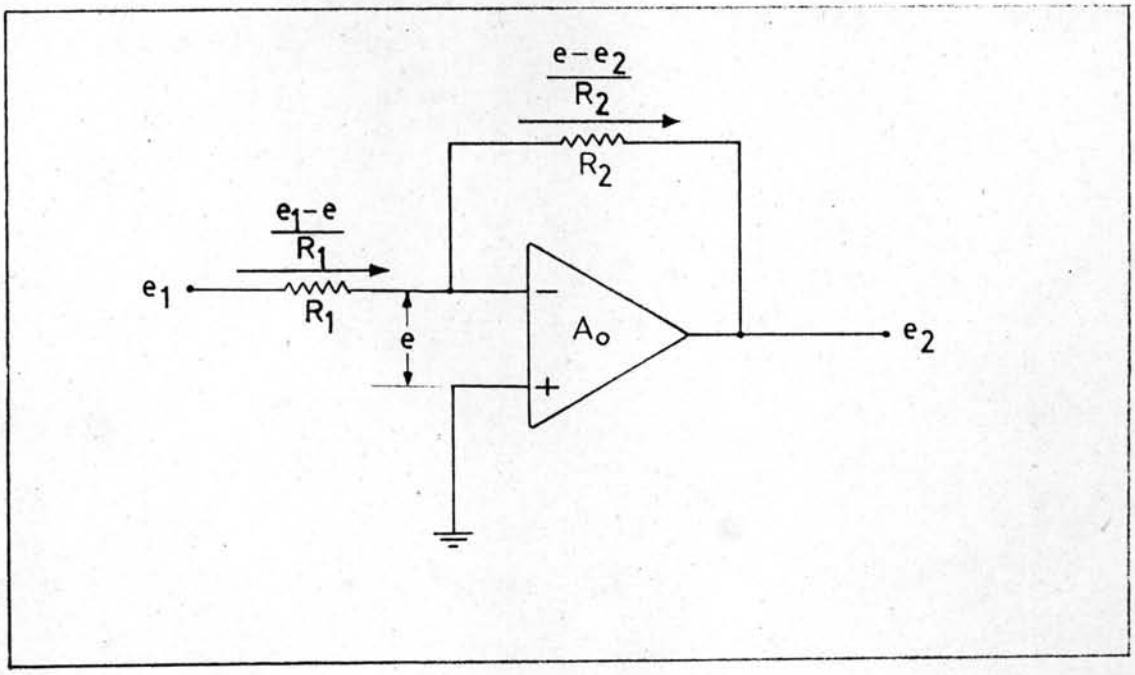
เครื่องขยายแบบหกกลับประกอบด้วยตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ดังแสดงในรูปที่ ก.3 R_1 ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานป้อนของวงจร R_2 ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานป้อนกลับ A_o คือกำลังขยายวงเปิดของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล ซึ่งมีค่าสูงมาก e_1 e และ e_2 เป็นแรงดันไฟฟ้าป้อนของวงจร แรงดันไฟฟ้าป้อนของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลและแรงดันไฟฟ้าคายของวงจรตามลำดับ แรงดันไฟฟ้าคาย e_2 จะมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าป้อน e คูณกับกำลังขยายวงเปิด A_o ดังนั้น

$$e_2 = A_o e \qquad (ก.1)$$

หรือ

$$e = \frac{e_2}{A_o} \qquad (ก.2)$$

กำลังขยายวงเปิด A_o ของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลมีค่าสูงมาก ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าป้อน e จึงมีค่าน้อยมาก และเนื่องจากขาป้อนบวกต่ออยู่กับดินจึงทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขาป้อนลบมีค่าเกือบเป็นศูนย์ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าขาป้อนลบของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลเปรียบเสมือนต่ออยู่กับดิน เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าป้อน e_1 จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 และ R_2 แต่จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลเลย เนื่องจากอิมพีแดนซ์ป้อนของเครื่อง



รูปที่ ก.3 วงจรเครื่องขยายแบบหกกลับ

ขยายออปเปอร์เรชันแนลมีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 และ R_2 จะมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$\frac{e_1-e}{R_1} = \frac{e-e_2}{R_2} \qquad (ก.3)$$

หรือ $\frac{e_1}{R_1} = \frac{-e_2}{R_2}$ เมื่อ $e \simeq 0$

หรือ $\frac{e_2}{e_1} = \frac{-R_2}{R_1}$ (ก.4)

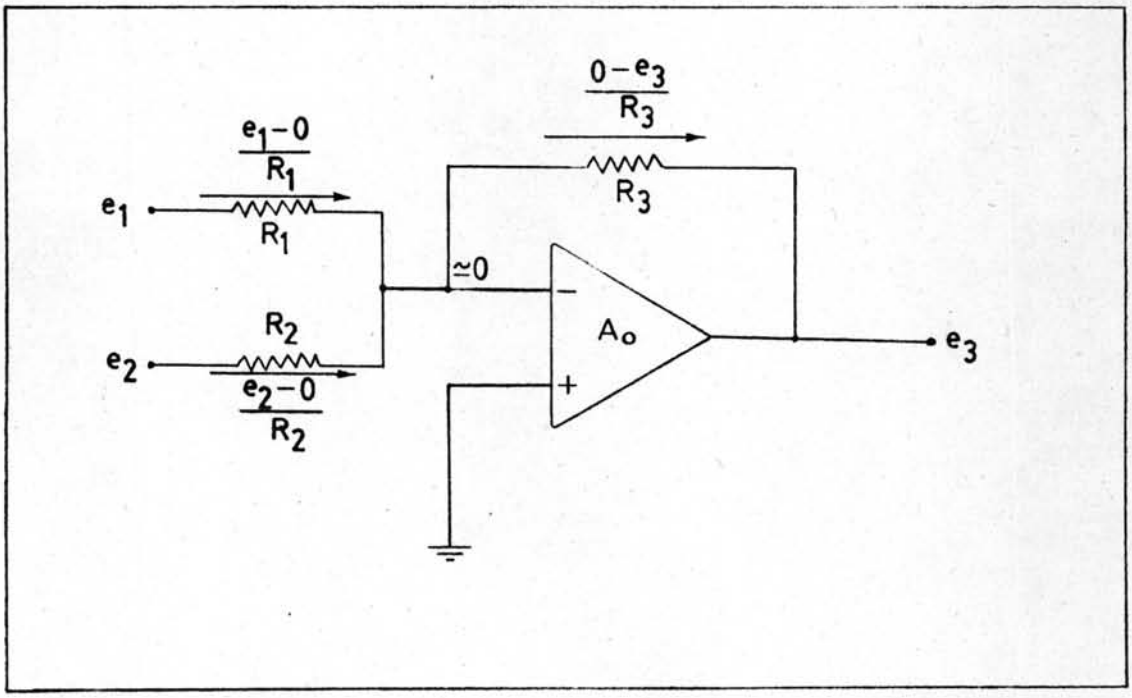
ฉะนั้นกำลังขยายวงปิดของวงจรจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างตัวต้านทาน R_2 และ R_1 เครื่องหมายลบแสดงว่าแรงดันไฟฟ้าคาย e_2 และแรงดันไฟฟ้าป้อน e_1 มีเฟสต่างกัน 180 องศา

ความต้านทานป้อนของวงจรมีค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าป้อนหารด้วยกระแสไฟฟ้าป้อน นั่นคือ

$$R_{in} = \frac{e_1}{(e_1 - e)/R_1} \simeq R_1 \quad \text{เมื่อ} \quad e \simeq 0 \qquad (ก.5)$$

เนื่องจากใช้วงจรป้อนกลับความต้านทานคายของวงจรจะมีค่าต่ำมาก

ก.5 เครื่องขยายรวม



รูปที่ ก.4 วงจรเครื่องขยายรวม

เครื่องขยายรวมประกอบด้วยเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลซึ่งมีกำลังขยายวงเปิด A_o ตัวต้านทานป้อน R_1 และ R_2 ตัวต้านทานป้อนกลับ R_3 ดังแสดงในรูป ก.4 e_1 และ e_2 เป็นแรงดันไฟฟ้าป้อน e_3 เป็นแรงดันไฟฟ้าคาย เนื่องจากขาป้อนบวกต่อลงดินและกำลังขยายวงเปิด A_o มีค่าสูงมาก ฉะนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ขาป้อน

ลบ จึงมีค่าเป็นศูนย์ หรือเสมือนต่อลงดินและไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลเลย ดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_3 เท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 และ R_2 นั่นคือ

$$\frac{e_1}{R_1} + \frac{e_2}{R_2} = -\frac{e_3}{R_3} \qquad (ก.6)$$

หรือ

$$e_3 = -\left(\frac{R_3 e_1}{R_1} + \frac{R_3 e_2}{R_2}\right) \qquad (ก.7)$$

ถ้า $R_1 = R_2 = R$

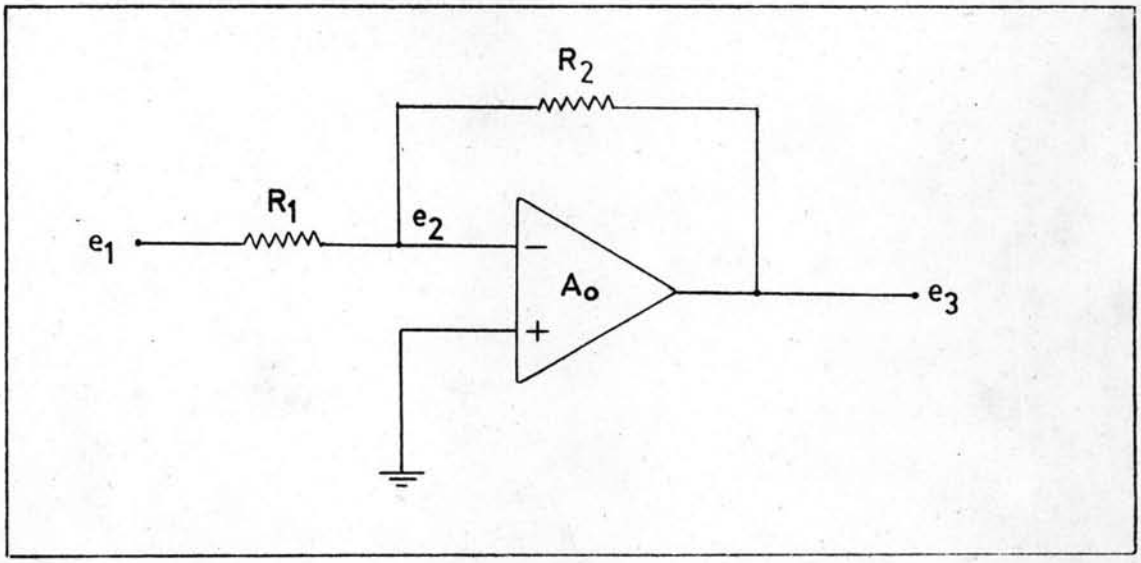
$$e_3 = -\frac{R_3}{R}(e_1 + e_2) \qquad (ก.8)$$

จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้าคาย e_3 มีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง คือ R_3/R คูณกับผลบวกของแรงดันไฟฟ้าป้อนทั้งสอง ถา $R_1=R_2=R_3$ แรงดันไฟฟ้าคาย e_3 จะมีค่าเท่ากับ $-(e_1 + e_2)$ เครื่องหมายลบแสดงว่าแรงดันไฟฟ้าป้อนและคายมีเฟสต่างกัน 180 องศา

ก.6 เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในทางปฏิบัติ

เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในทางปฏิบัติมีสมบัติต่างไปจากเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในอุดมคติ และมีขีดจำกัดอยู่บ้างเล็กน้อย เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในทางปฏิบัติที่มีคุณภาพสูงจะมีสมบัติเกือบเป็นเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในอุดมคติในการออกแบบวงจรซึ่งใช้เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลส่วนใหญ่แล้วถือว่าเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลที่ใช้มีสมบัติเช่นเดียวกับเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในอุดมคติ แต่อย่างไรก็ตามผลของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในทางปฏิบัติก็มีความสำคัญอยู่บ้าง ดังนี้

ก.6.1 ผลของกำลังขยายวงเปิดจำกัด



รูปที่ ก.5 วงจรเครื่องขยายแบบหกกลับที่มีกำลังขยายวงเปิดจำกัด

พิจารณาวงจรเครื่องขยายแบบหกกลับตามรูปที่ ก.5 สมมุติว่าเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลมีสมบัติเป็นอุดมคติทั้งหมดยกเว้นกำลังขยายวงเปิด (A_o) ซึ่งมีค่าแน่นอนค่าหนึ่ง ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ขาป้อนลบจึงมีค่าไม่เป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าขาย e_3 จะมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างกำลังขยายวงเปิดกับศักย์ไฟฟ้าที่ขาป้อนลบ นั่นคือ

$$e_3 = -A_o e_2 \qquad (ก.9)$$

$$e_2 = \frac{-e_3}{A_o} \qquad (ก.10)$$

เนื่องจากเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลมีอิมพีแดนซ์ป้อนเป็นอนันต์จึงไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทาน R_1 และ R_2 จึงเท่ากัน

$$\frac{e_1 - e_2}{R_1} = \frac{e_2 - e_3}{R_2} \qquad (ก.11)$$

จากสมการที่ (ก.10) และ (ก.11) จะได้ว่า

$$\frac{e_3}{e_1} = -\frac{R_2}{R_1}\left(\frac{1}{1+(1/A_o)(1+R_2/R_1)}\right) \qquad (ก.12)$$

สมการที่ (ก.12) แสดงกำลังขยายวงปิด (A_F) ของเครื่องขยายแบบหกกลับที่มีกำลังขยายวงเปิดของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลจำกัด สมมุติว่า

$$\frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (ก.13)$$

จากสมการที่ (ก.12) และ (ก.13) เราอาจเขียนได้ว่า

$$A_F = \frac{e_3}{e_1} = \frac{-R_2}{R_1}\left(\frac{1}{1 + 1/A_o\beta}\right) \qquad (ก.14)$$

ปริมาณ $A_o\beta$ เรียกว่า กำลังขยายวง (Loop gain) ซึ่งเป็นปริมาณที่ชี้ให้ทราบว่าวงจรที่ใช้ผิดไปจากวงจรในอุดมคติมากน้อยเพียงใด สมการที่ (ก.14) สามารถกระจายโดยใช้ทฤษฎีไบโนเมียล (Binomial theory) ได้ดังนี้

$$A_F = \frac{-R_2}{R_1}\left(1 - \frac{1}{A_o\beta} + \left(\frac{1}{A_o\beta}\right)^2 \cdots\cdots\right)$$

$$= \frac{-R_2}{R_1}\left(1 - \frac{1}{A_o\beta}\right) \quad \text{ถ้า } A_o\beta \gg 1 \qquad (ก.15)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขยายวง กำลังขยายวงเปิดและกำลังขยายวงปิด เมื่อกำลังขยายวงปิดมีค่าประมาณ 5 หรือมากกว่า อาจสรุปได้ดังนี้

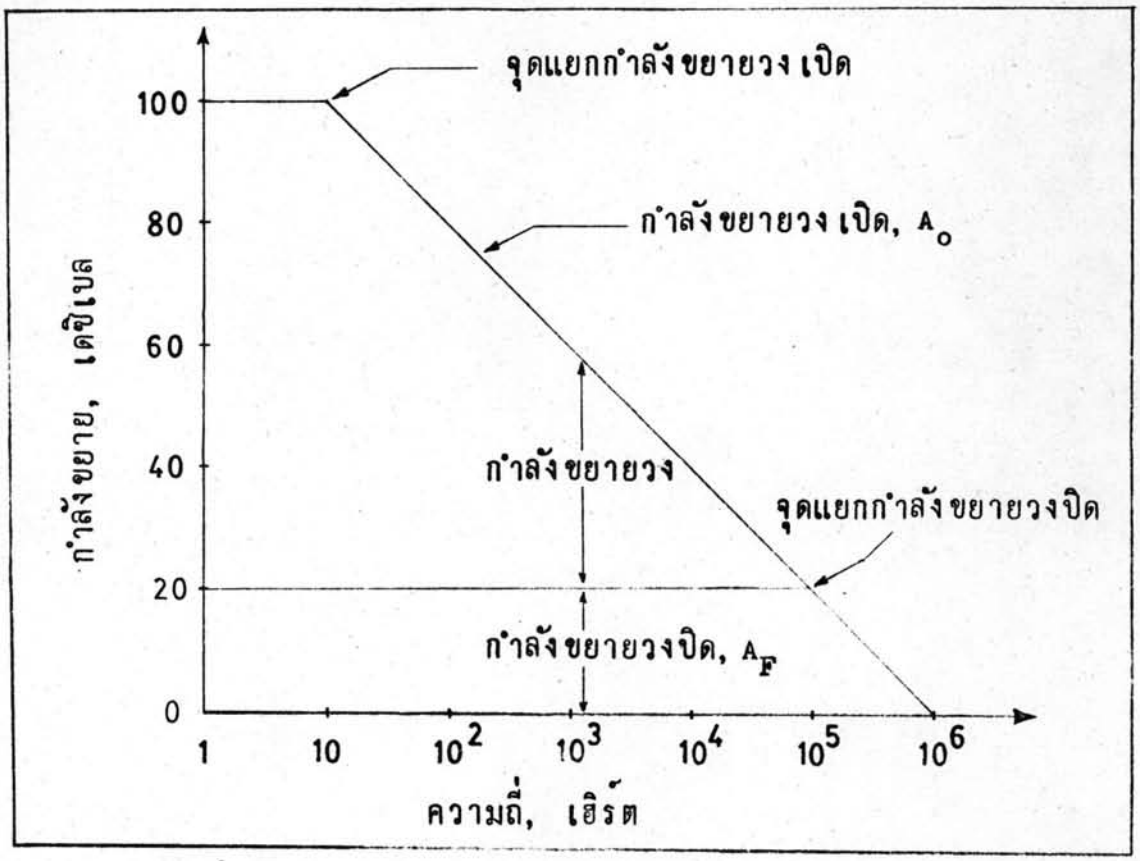
$$\text{กำลังขยาย} \simeq \frac{\text{กำลังขยายวงเปิด}}{\text{กำลังขยายวงปิด}} \qquad (ก.16)$$

เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลที่มีกำลังวงเปิดจำกัดจะทำให้กำลัง

ขยายวงปิดของวงจรคลาดเคลื่อนไปจาก เมื่อคำนวณโดยใช้สมบัติของ เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในอุดมคติบ้าง เล็กน้อย ความคลาดเคลื่อนนี้ไม่สำคัญนัก เพราะสามารถแก้ไขได้โดยการปรับค่าความต้านทาน R_1 หรือ R_2

ก.6.2 ผลของแถบกว้างความถี่จำกัด เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในทางปฏิบัติสามารถใช้งานได้ดีในแถบความถี่จำกัดค่าหนึ่งแล้วแต่ชนิดที่ใช้ เมื่อความถี่มีค่ามากขึ้น สมบัติของ เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลในทางปฏิบัติจะต่างกับในแบบอุดมคติมากขึ้น นอกจากนี้ผลของแถบกว้างความถี่จำกัดยังทำให้วงจรขยาย เกิดการสั่นอีกด้วย

การวิเคราะห์ผลของแถบกว้างความถี่จำกัดกระทำได้โดยใช้กราฟของโบด (Bode plot) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขยายกับความถี่ ดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 แสดงกราฟของโบด

กำลังขยายในหน่วยเดซิเบลสัมพันธ์กับกำลังขยาย ดังนี้

$$\text{เดซิเบล (dB)} = 20 \log (\text{กำลังขยาย}) \qquad (ก.17)$$

จากรูปที่ (ก.6) จะเห็นว่าที่ความถี่ต่ำกำลังขยายวงเปิดของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันมีค่าเท่ากับ 100 เดซิเบล หรือ 100,000 เท่า เมื่อความถี่สูงกว่า 10 เฮิร์ต กำลังขยายวงเปิดจะค่อย ๆ ลดลงจนเป็น 0 เดซิเบล เมื่อความถี่เท่ากับ 10^6 เฮิร์ต ตำแหน่งที่กำลังขยายเริ่มลดลงเรียกว่าจุดแยก (Break point) ซึ่งหมายถึงจุดที่กำลังขยายลดลงจากเดิม 3 เดซิเบล หรือประมาณ 1.4 เท่า

ค่าความชันของการลดลงของกำลังขยายมีความสัมพันธ์กับการเลื่อนเฟส (Phase shift) ของสัญญาณคาย ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟระหว่างกำลังขยายกับองศาได้ โดยปกติกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขยายกับองศามักจะไม่ให้มา แต่เราสามารถทราบได้ดังนี้ ถ้าความชันของการลดลงของกำลังขยายเท่ากับ 20 เดซิเบลต่อเดเคด (dB/decade) หรือ 40 เดซิเบลต่อเดเคด การเลื่อนเฟสจะมีค่าเท่ากับ 90 หรือ 180 องศาตามลำดับ

เอช เอน โบด (H.N. Bode) ได้ชี้แจงว่ากำลังขยายวงปิดของวงจรจะมีเสถียรภาพสูงก็ต่อเมื่อค่าความชันของการลดลงของกำลังขยายเปิดมีค่าน้อยกว่า 40 เดซิเบลต่อเดเคดภายในบริเวณที่กราฟของกำลังขยายวงเปิดและกำลังขยายวงปิดติดกัน

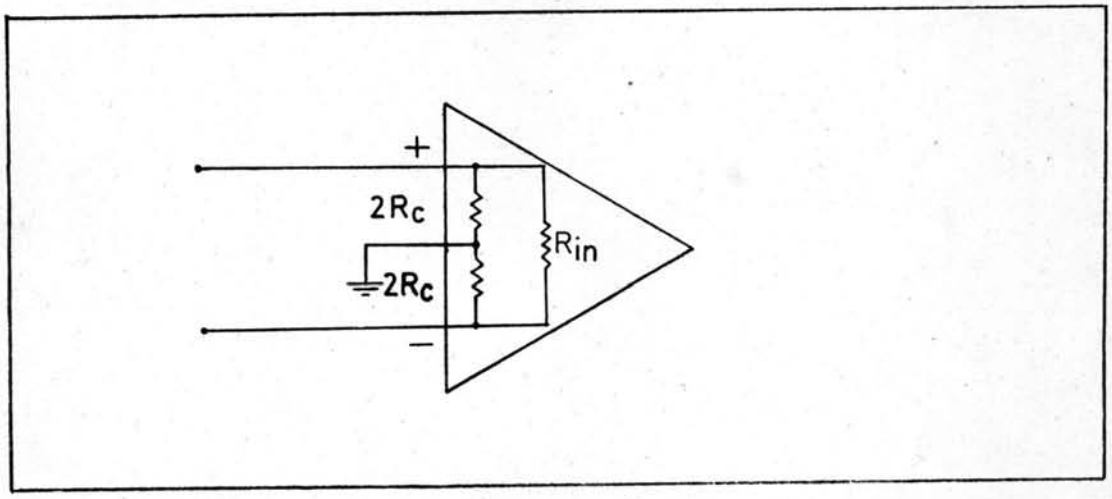
จากกราฟในรูปที่ (ก.6) จะเห็นว่าจุดแยกของกำลังขยายวงเปิดอยู่ที่ความถี่ประมาณ 10 เฮิร์ต ซึ่งเป็นความถี่ที่ต่ำมาก การใช้สัญญาณป้อนกลับจะทำให้เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลทำงานในแถบความถี่ที่กว้างขึ้นได้ เมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่าจุดแยกของกำลังขยายวงปิดอยู่ที่ความถี่ 10^5 เฮิร์ต

อัตราเร็วในการทำงานของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันขึ้นอยู่กับแถบกว้างความถี่และค่าความชันของการลดลงของกำลังขยาย อัตราเร็วในการทำงานของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลเรียกว่า อัตราแกว่ง (Slew rate) ซึ่งเป็นอัตราเร็วสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้าคายสามารถเปลี่ยนแปลงได้ มักจะมีหน่วย

เป็นโวลท์ต่อไมโครวินาที

ผลของแถบกว้างความถี่จำกัดสามารถแก้ไขได้โดยต่อวงจรที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของ เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลและชนิดของวงจรอันจะทำให้ กำลังขยายวงปิดของวงจรคลาดเคลื่อนไปจากการคำนวณในแบบอุดมคตินอ้ยมาก

ก.6.3 ผลของความต้านทานป้อน เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล ในทางปฏิบัติจะมีความต้านทานป้อนไม่เท่ากับอนันต์ดัง เช่นที่สมมุติในแบบอุดมคติ รูปที่ (ก.7) แสดงความต้านทานป้อนของ เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล R_{in} เป็นความต้านทานระหว่างขาป้อนบวกและลบ

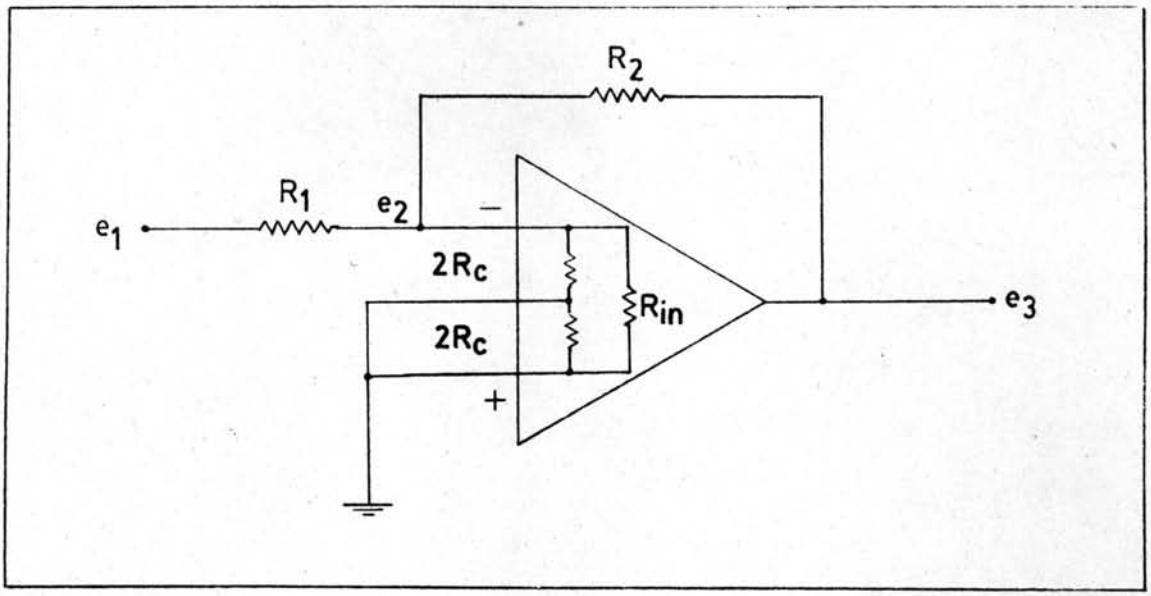


รูปที่ ก.7 อิมพีแดนซ์ป้อนของ เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล

R_c เป็นความต้านทานระหว่างขาป้อนแต่ละขากับดิน ผลของอิมพีแดนซ์เหล่านี้ จะทำให้กำลังขยายวงลดลง

พิจารณาวงจรขยายแบบหกกลับในรูปที่ ก.8 จะเห็นว่าความต้านทาน ป้อนจากขาป้อนลบไปยังดิน คือ R_{in} ขนานกับ $2R_c$ สำหรับเครื่องขยายออปเปอร์ เรชันแนลที่มีคุณภาพสูง R_c จะมีค่ามากกว่า R_{in} มาก ดังนั้นเราจึงสามารถตัด R_c ทิ้งได้ ในกรณีเช่นนี้เราถือว่าความต้านทานจากขาป้อนลบไปยังดิน คือ R_{in}

สมการสำหรับวงจรนี้คล้ายกับสมการที่ (ก.3) แต่ต่างกันที่มีกระแส ไฟฟ้าบางส่วนไหลเข้าขาป้อนลบ ดังนั้นจะได้ว่า



รูปที่ ก.8 วงจรขยายแบบหักกลับแสดงอิมพีแดนซ์ป้อน

$$\frac{e_1 - e_2}{R_1} = \frac{e_2}{R_{in}} + \frac{e_2 - e_3}{R_2} \qquad (ก.18)$$

และ $$e_2 = \frac{-e_3}{A_o} \qquad (ก.19)$$

จากสมการที่ (ก.18) และ (ก.19) จะได้ว่า

$$A_F = \frac{-e_3}{e_1} = \frac{-R_2}{R_1}\left(\frac{1}{1+\frac{1}{A_o}\left(1+\frac{R_2}{R_1}+\frac{R_2}{R_{in}}\right)}\right) \qquad (ก.20)$$

ทำนองเดียวกับสมการที่ (ก.13) เรากำหนดให้ $1/B$ เป็นสัมประสิทธิ์ของ $1/A_o$ นั่นคือ

$$\frac{1}{\beta} = 1+\frac{R_2}{R_1}+\frac{R_2}{R_{in}} \qquad (ก.21)$$

จะเห็นว่าผลของ R_{in} ทำให้ $1/\beta$ มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้กำลังขยายวง $(A_o\beta)$ มีค่าลดลง

จากสมการที่ (ก.19) ถ้า A_o มีค่ามาก e_2 ก็จะมีค่าน้อย ดังนั้น

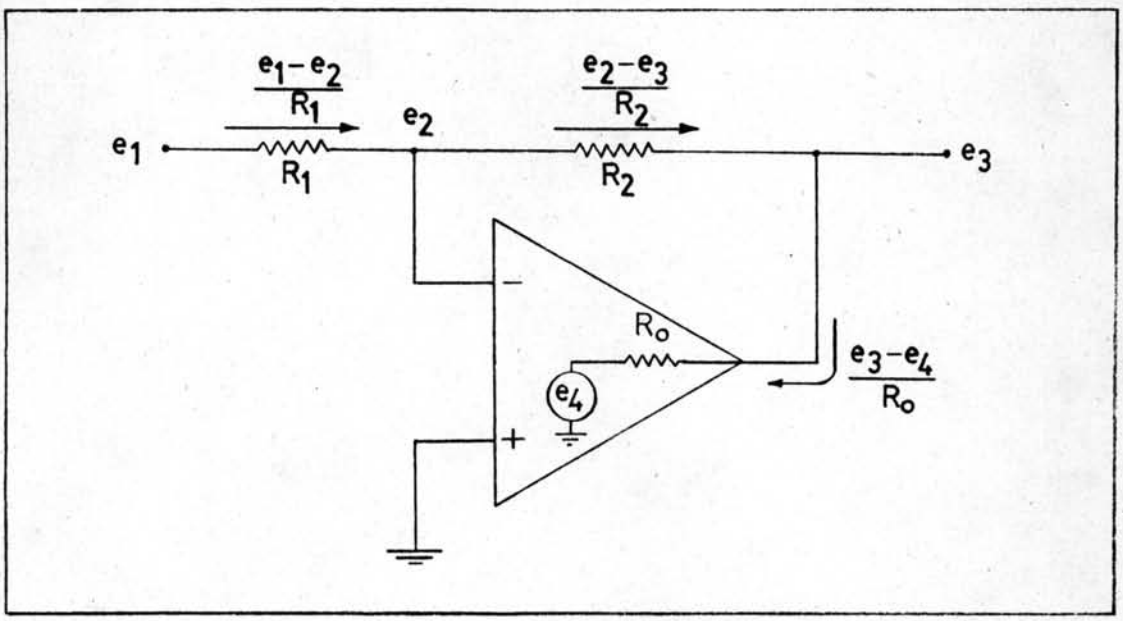
ความต้านทานป้อนของวงจรจะเท่ากับ R_1 เช่นเดิม

ก.6.4 ผลของความต้านทานคาย พิจารณาวงจรในรูปที่ ก.9 ซึ่งเป็นวงจรขยายแบบหกกลับและมีค่าอิมพีแดนซ์คาย (R_o) ที่ไม่เป็นศูนย์ จากวงจรนี้จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_1 R_2 และ R_o จะมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$\frac{e_1 - e_2}{R_1} = \frac{e_2 - e_3}{R_2} = \frac{e_3 - e_4}{R_o} \qquad (ก.22)$$

และ

$$e_2 = -\frac{e_4}{A_o} \qquad (ก.23)$$



รูปที่ ก.9 วงจรขยายแบบหกกลับแสดงอิมพีแดนซ์คาย

จากสมการที่ (ก.23) จะเห็นว่ากำลังขยายวงเปิด (A_o) ขยายแรงดันไฟฟ้า e_2 ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า e_3 แต่เนื่องจากอิมพีแดนซ์คาย (R_o) มีค่าไม่เท่ากับศูนย์จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าคายมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้า e_4 ดังนั้นผลของอิมพีแดนซ์คายจึงทำให้กำลังขยายวงเปิด (A_o) มีค่าลดลง เราจะเห็นผลอันนี้ได้โดยการแก้สมการ (ก.22) และ (ก.23) เพื่อหากำลังขยายวงปิด (A_F)

เพื่อช่วยให้การแก้สมการง่ายขึ้น เราจะแทน e_4 ในเทอมของ e_3 คือ

$$e_4 = e_3 \left(\frac{R_2 + R_o}{R_2 - R_o/A_o} \right) \qquad (ก.24)$$

โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว $R_2 \gg R_o/A_o$ ดังนั้นสมการที่ (ก.24) กลายเป็น

$$e_4 = e_3 \left(1 + \frac{R_o}{R_2} \right) \qquad (ก.25)$$

จากสมการที่ (ก.22) (ก.23) และ (ก.25) จะได้ว่า

$$\frac{e_3}{e_1} = -\frac{R_2}{R_1} \left[\frac{1}{1 + \left(1 + \frac{R_o}{R_2}\right)\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(\frac{1}{A_o}\right)} \right] \qquad (ก.26)$$

ทำนองเดียวกับสมการที่ (ก.13) สมมุติให้สัมประสิทธิ์ของ $1/A_o$ เป็น $1/\beta$ นั่นคือ

$$\frac{1}{\beta} = \left(1 + \frac{R_o}{R_2} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \qquad (ก.27)$$

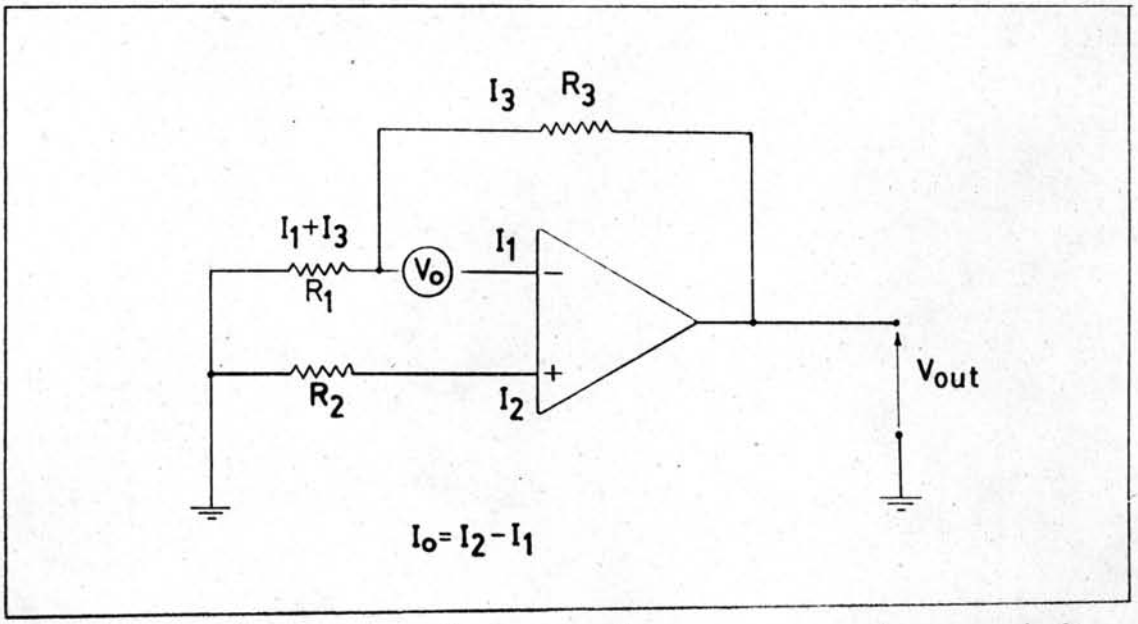
จากสมการนี้จะเห็นว่าผลของอิมพีแดนซ์คายที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ทำให้ $1/\beta$ มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้กำลังขยายวง ($A_o\beta$) มีค่าลดลง

กำลังขยายวง ($A_o\beta$) ของวงจรมีค่ามาก เราสามารถประมาณค่าของอิมพีแดนซ์คายได้คือ

$$\text{อิมพีแดนซ์คายปิด } (R_o') \simeq \frac{\text{อิมพีแดนซ์คายเปิด } (R_o)}{\text{กำลังขยายวง } (A_o\beta)} \qquad (ก.28)$$

อิมพีแดนซ์คายเปิดหมายถึงอิมพีแดนซ์คายของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลไม่มีแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ อิมพีแดนซ์คายปิดหมายถึงอิมพีแดนซ์คายของวงจรเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับและมักจะมีค่าน้อยกว่า 1 โอห์มเสมอ

ก.6.5 ผลของออฟเซทและการเลื่อน (Drift) ในแบบอุดมคติ



รูปที่ ก.10 วงจรทั่วไปของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลที่ใช้ในการวิเคราะห์ออฟเซทและกระแสไฟฟ้าป้อน

แรงดันไฟฟ้าคายของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติมักจะมีแรงดันไฟฟ้าคายเกิดขึ้นเสมอถึงแม้ว่าจะไม่มีแรงดันไฟฟ้าป้อนเลย แรงดันไฟฟ้าคายที่เกิดขึ้นเรียกว่า ออฟเซท ออฟเซทเกิดจากสาเหตุ 2 อย่างคือ แรงดันไฟฟ้าป้อนออฟเซทและกระแสไฟฟ้าป้อนออฟเซท ผลของออฟเซทสามารถแก้ไขได้ไม่ยากนักโดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากับออฟเซทแต่มีทิศทางตรงกันข้ามเพื่อหักล้างกับออฟเซทนี้

ปัญหาที่สำคัญกว่าเกี่ยวกับออฟเซท คือ การแปรค่าของออฟเซทขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องจ่ายกำลัง การแปรค่าของออฟเซทเรียกว่าการเลื่อน รูปที่ ก.10 แสดงแหล่งกำเนิดของออฟเซททั้งสอง

การวิเคราะห์ออฟเซทสามารถกระทำได้ง่าย โดยต่อขาป้อนทั้งสองของเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลลงดินผ่านตัวต้านทาน R_1 และ R_2 ดังแสดงในรูปที่ ก.10 แรงดันไฟฟ้าป้อนออฟเซทและกระแสไฟฟ้าป้อนออฟเซทมีความหมายดังนี้

แรงดันไฟฟ้าป้อนออฟเซท (V_o) คือแรงดันไฟฟ้าที่จะต้องป้อนให้แก่ขาป้อนของ เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล เพื่อทำให้แรงดันไฟฟ้าคาย เท่ากับศูนย์

กระแสไฟฟ้าป้อนออฟเซท (I_o) คือผลต่างระหว่างกระแสไฟฟ้าทั้งสองที่ไหล เข้าขาป้อนของ เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนล

แรงดันไฟฟ้าคายออฟเซทขึ้นอยู่กับ V_o I_o R_1 R_2 และ R_3 จากรูปที่ ก.10 จะได้ว่าผลรวมระหว่างแรงดันไฟฟ้าคร่อม R_1 และ R_3 จะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าคายออฟเซท (Vout) นั่นคือ

$$(I_1 + I_3) R_1 + I_3 R_3 = Vout \qquad (ก.29)$$

และผลรวมของแรงดันไฟฟ้าคร่อม R_1 R_2 และ V_o จะมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$(I_1 + I_3) R_1 - V_o - I_2 R_2 = o \qquad (ก.30)$$

จากสมการที่ (ก.29) และ (ก.30) จะได้ว่า

$$Vout = V_o \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) + I_2 R_2 \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) - I_1 R_3 \qquad (ก.31)$$

เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลที่มีคุณภาพสูงจะมีค่ากระแสไฟฟ้า I_1 และ I_2 เท่ากันหรือเกือบจะเท่ากัน เราสามารถลดค่า Vout ให้มีค่าต่ำสุดได้โดยให้สัมประสิทธิ์ของ I_1และ I_2 เท่ากัน จะได้ว่า

$$R_3 = R_2 \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) \qquad (ก.32)$$

หรือ

$$R_2 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \qquad (ก.33)$$

สมการที่ (ก.33) แสดงให้เห็นว่าถ้าต้องการให้แรงดันไฟฟ้าคายออฟเซทมีค่าน้อยที่สุด จะต้องใช้ค่า R_2 เท่ากับ R_1 ขนานกับ R_3 สมการที่ (ก.31) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$Vout = V_o \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) + I_o R_3 \qquad (ก.34)$$

และ $$I_o = I_2 - I_1$$

เมื่อวิเคราะห์ผลของการเลื่อน เราแทนปริมาณ Vout V_o และ I_o ด้วย ΔVout ΔV_o และ ΔI_o ลงในสมการที่ (ก.34) จะได้ว่า

$$\Delta Vout = \Delta V_o \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right) + \Delta I_o R_3 \qquad (ก.35)$$

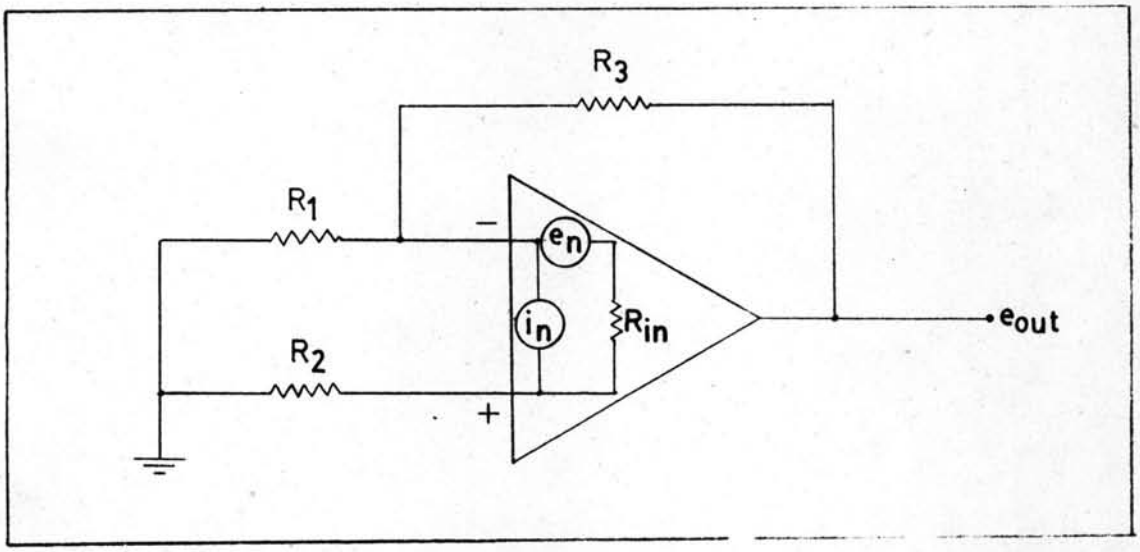
ก.6.6 ผลของสัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนอาจนิยามได้ว่าเป็นสัญญาณที่เกิดซ้อนขึ้นที่ขาคายโดยไม่มีสัญญาณนี้ที่ขาป้อนเลย ตามรูปที่ ก.11 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนมี 2 แหล่งคือ แรงดันไฟฟ้าป้อนรบกวน (e_n) และกระแสไฟฟ้าป้อนรบกวน

e_n เป็นค่าอา. เอ็ม. เอส (R.M.S) ของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าป้อนรบกวนต่อรากที่สองของรอบซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในแถบกว้างความถี่ Δf เท่ากับ $e_n^2 \Delta f$

i_n เป็นค่าอา. เอ็ม. เอส ของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้ารบกวนต่อรากที่สองของรอบ ดังนั้น จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในแถบกว้างความถี่ Δf เท่ากับ $i_n^2 \Delta f$

e_n สามารถวัดได้โดยวัดสัญญาณรบกวนที่ขาคายในขณะที่ขาป้อนต่อลงดิน และ i_n วัดได้ด้วยวิธีเดียวกัน ความต้านทานของแหล่งกำเนิด i_n จะมีค่ามาก ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมซึ่งมีค่ามากกว่า e_n มาก ในขณะเดียวกันก็จะมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากตัวต้านทานที่ร้อนด้วย

แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าป้อนรบกวนตามรูปที่ ข.11 มีส่วนประกอบ 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่งซึ่งเป็นส่วนสำคัญ คือ e_n ส่วนที่สองเกิดจากกระแสไฟฟ้า i_n ที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของวงจรทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ารบกวนขึ้น อิมพีแดนซ์เมื่อมอง



รูปที่ ก.11 เครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลแสดงแหล่งกำเนิดของแรงดันไฟฟ้าป่อนรบกวนและกระแสไฟฟ้าป่อนรบกวน

จากแหล่งกำเนิด i_n จะมีค่าเท่ากับ

$$R = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1+R_3} \qquad (ก.36)$$

ฉะนั้นแรงดันไฟฟ้ารบกวนจะมีค่าเท่ากับ $i_n R$ ส่วนที่สาม คือ ไวท์ หรือสัญญาณรบกวนจอห์นสัน (Write or Johnson noise) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{4\,KTR\,\Delta f}$ โดยที่

K = ค่าคงที่ของโบลซ์มาน (Boltzmann's constant)
= 1.38×10^{-23} จูลต่อองศาเคลวิน
T = อุณหภูมิในหน่วยของศาสมบูรณ์ (K)
R = ความต้านทานที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน
Δf = แถบกว้างความถี่

ส่วนประกอบทั้งสามนี้เมื่อรวมกันแล้วเป็นแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าป่อนรบกวน e_e ซึ่งมีค่าเป็น

$$e_e^2 = 4\,KTR + i_n^2 R^2 + e_n^2 \qquad (ก.37)$$

ค่า e_e ตามสมการที่ (ก.37) เป็นค่าแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารบกวนต่อหนึ่งแถบกว้างความถี่ ถ้าเครื่องขยายออปเปอร์เรชันแนลใช้งานในแถบกว้างความถี่ Δf เท่ากับ 100 เฮิร์ต และความต้านทานของวงจร R เป็น 100 กิโลโอห์ม ถ้า i_n เป็น 10^{-12} แอมแปร์ต่อรากที่สองของเฮิร์ต และ e_n เป็น 10^{-7} โวลท์ต่อรากที่สองของเฮิร์ต ดังนั้นแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้ารบกวน (e_e) หาได้ดังนี้

$$4\,KT = 1.66 \times 10^{-20} \quad \text{ณ อุณหภูมิห้อง}$$

สำหรับแถบกว้างความถี่ 1 เฮิร์ต

$$e_e^2 = (1.66 \times 10^{-20})(10^5) + (10^{-24})(10^{10}) + (10^{-14})$$

$$= 2.166 \times 10^{-14} \quad V^2$$

สำหรับแถบกว้างความถี่ 100 เฮิร์ต.

$$e_e^2 = (100)(2.166 \quad 10^{-14})$$

$$= 2.166 \times 10^{-12} \quad V^2$$

$$e_e = 1.47 \quad \mu V$$