

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อ ชุคปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีฟังก์ชันเฉพาะตัว  
Functional Electronic Laboratory

ชื่อนักศึกษา

1. นายปิยะ	โจพิมพ์	รหัสประจำตัว	41031216
2. นายไพโรจน์	ปิ่นสุข	รหัสประจำตัว	41031217
3. นายมณูญ	ขุนอนันต์	รหัสประจำตัว	41031221
4. นางสาวศศิธร	พรประสิทธิ์	รหัสประจำตัว	41031226

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์กิติพงศ์ มะโน

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ไพบุลย์ พวงวงศ์ตระกูล

คณะกรรมการสอบปริญญาโท	ลายมือชื่อ
1. อาจารย์กิติพงศ์ มะโน	
2. ผศ.วิสุทธิ อธิพรธรรม	
3. อาจารย์พีระวุฒิ สุวรรณจันทร์	
4. อาจารย์ปิยะ ศุภวราสุวัฒน์	
5. อาจารย์อมรรักษ์ ชัยชนะ	

วัน/เดือน/ปีที่สอบ วันเสาร์ที่ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2543 เวลา 16.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.310 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 37199  
วัน, เดือน, ปี..... 5 พ.ย. 2543

ภาควิชารับรองแล้ว  
ลงนาม.....   
(ผศ.วิสุทธิ อธิพรธรรม)

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม

วันที่..... 30 เดือน..... พ.ศ..... 2543



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญานิพนธ์

ชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว

FUNCTIONAL ELECTRONIC LABORATORY



นายปิยะ โจฬิมพ์  
นายไพโรจน์ ปิ่นสุข  
นายมณูญ ชุนอนันท์  
นางสาวศศิธร พรประสิทธิ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญาโท

เรื่อง ชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว  
FUNCTIONAL ELECTRONIC LABORATORY

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว เช่น วงจรขยาย วงจรกรองความถี่ วงจรแหล่งจ่ายกระแส วงจรขยายออปแอมป์
2. ศึกษาการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โปรแกรมบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์
3. ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัวเช่น วงจรขยาย วงจรกรองความถี่ วงจรแหล่งจ่ายกระแส ขยายออปแอมป์ โดยจัดทำไม่ต่ำกว่า 20 หน้า
4. เพื่อสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัวเช่น วงจรขยาย วงจรกรองความถี่ วงจรแหล่งจ่ายกระแส วงจรขยายออปแอมป์ โดยจัดทำไม่ต่ำกว่า 20 หน้า
5. เพื่อนำชุดทดลองพร้อมตัวใบงานการทดลองไปใช้ประกอบการเรียนการสอน

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว วงจรขยาย วงจรกรองความถี่ วงจรแหล่งจ่ายกระแส วงจรขยายออปแอมป์ เป็นต้น
2. มีความรู้เข้าใจการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้โปรแกรมบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์
3. ได้ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว วงจรขยาย วงจรกรองความถี่ วงจรแหล่งจ่ายกระแส วงจรขยายออปแอมป์ เป็นต้น
4. ได้สร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว วงจรขยาย วงจรกรองความถี่ วงจรแหล่งจ่ายกระแส วงจรขยายออปแอมป์ เป็นต้น
5. ได้ชุดทดลองพร้อมตัวใบงานการทดลองเพื่อนำไปใช้ประกอบการเรียนการสอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I

ชื่อหัวข้อ	ชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว
นักศึกษา	นายปิยะ โจพิมพ์ นายไพโรจน์ ปิ่นสุข นายมนูญ ชูอนันท์ นางสาวศศิธร พรประสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์กิติพงศ์ มะโน
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ไพบุลย์ พวงวงศ์ตระกูล
หลักสูตร	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2542

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและการสร้างชุดทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนของชุดทดลองที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟและสัญญาณต่าง ๆ ส่วนที่สองจะประกอบด้วยชุดทดลองย่อยของแต่ละวงจร ชุดทดลองนี้จะช่วยให้เข้าใจหลักการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ อีกทั้งช่วยลดความยุ่งยากในการประกอบวงจรเพื่อใช้ทดลองและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ได้อีก

## II

<b>Thesis Title</b>	Functional Electronic Laboratory
<b>Students</b>	Mr.Piya Khopim Mr.Pairoj Pinsook Mr.Manoon Khunanan Miss Sasitorn Pornprasit
<b>Advisor</b>	Mr.Kitipong Mano
<b>Co - Advisor</b>	Mr.Paibool Pungwungtakol
<b>Education Level</b>	Bachelor of Science in Industrial Education
<b>Program in</b>	Telecommunication Engineering
<b>Academic Year</b>	1999

### ABSTRACT

This thesis presents a designing and implementation of functional electronic laboratory. The project can be divided in to two path ; generator function of the main project an signal ; the second path is components the experiment with functional. The functional electronic laboratory can help work standard for to electronic functional and the functional electronic laboratory can help lower to get involved to the functional for experiment and the functional electronic to applied with experiment functional electronic too.Yours respectfully

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องมาจากความร่วมมือของสมาชิกภายในกลุ่มทุกๆท่าน ขอขอบคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์และคณาจารย์ทางภาควิชาครุศาสตร์ วิศวกรรมทุกท่านที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์ รวมทั้งยังให้คำปรึกษาแนะนำ แนวความคิดความรู้ต่าง ๆ แนวทางการแก้ไขปัญหา ในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม หอสมุดกลางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการค้นคว้าข้อมูล และเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านความคิด และ กำลังใจ สุดท้ายที่ควรระลึกถึงอย่างยิ่ง บิดา และมารดาที่เป็นผู้ให้ความสนับสนุน ทางด้านการศึกษา และเป็นผู้ให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 จี๊ดความสามารถของโครงการ	1
1.3 เนื้อหาโดยสังเขป	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์	3
2.2 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	3
2.3 วงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์	4
2.3.1 วงจรขยายอิมิตเตอร์	4
2.3.2 วงจรขยายเบสร่วม	10
2.3.3 วงจรขยายคอลเลคเตอร์	12
2.4 ตัวขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์	14
2.4.1 วงจรขยายซอสร่วม	14
2.4.2 วงจรขยายเกทร่วม	20
2.4.3 วงจรขยายเดรนร่วม	22
2.5 ตัวขยายผลต่าง	23
2.5.1 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์	26
2.5.2 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์	30
2.6 แหล่งจ่ายกระแสที่ใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์	31
2.6.1 ตัวสะท้อนกระแสพื้นฐาน	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.6.2 แหล่งจ่ายกระแสพื้นฐานที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต	35
2.6.3 แหล่งจ่ายกระแสแบบคาสโคด	36
2.6.4 แหล่งจ่ายกระแสวิลสัน	40
2.6.5 แหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์	42
2.7 วงจรกรองความถี่	44
2.7.1 ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ใช้งาน	45
2.7.2 วงจรกรองความถี่ที่ออกแบบโดยการคำนวณ	46
2.7.3 วงจรกรองความถี่เฉพาะย่านแบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน	53
2.8 วงจรขยายออปแอมป์	55
2.8.1 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส	55
2.8.2 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส	56
2.8.3 วงจรขยายผลรวม	58
2.8.4 วงจรหาค่าเฉลี่ย	59
บทที่ 3 การออกแบบการสร้างและการทำงาน	61
3.1 กล่าวนำ	61
3.2 การออกแบบชุดทดลอง	61
3.3 การออกแบบวงจร	62
3.3.1 การออกแบบวงจขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์	62
3.3.2 การออกแบบวงจขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	72
3.3.3 การออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกระแส	76
3.3.4 การออกแบบวงจขยายผลต่าง	83
3.3.5 การออกแบบวงจรกรองความถี่	89
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	105
4.1 กล่าวนำ	105
4.2 ขั้นตอนการทดลอง	105
4.3 การทดลองและผลการทดลอง	106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.3.1 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	106
4.3.2 วงจรขยายเบสร่วม	110
4.3.3 วงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม	114
4.3.4 วงจรขยายซอสร่วม	118
4.3.5 วงจรขยายเดรนร่วม	122
4.3.6 วงจรขยายเกทร่วม	126
4.3.7 การทดลองวงจขยายผลต่าง	130
4.3.8 การทดลองวงจขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	138
4.3.9 วงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์	139
4.3.10 วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต	141
4.3.11 วงจรแหล่งจ่ายกระแสคลาสโคค	142
4.3.12 วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลสัน	144
4.3.13 วงจรแหล่งจ่ายวิดลาร์	145
4.3.14 วงจรรองความถี่ต่ำอันดับ 1	147
4.3.15 วงจรรองความถี่สูงอันดับ 1	148
4.3.16 วงจรรองความถี่ต่ำอันดับ 2	150
4.3.17 วงจรรองความถี่สูงอันดับ 2	152
4.3.18 วงจรรองเฉพาะแถบความถี่	154
4.3.19 วงจรขยายออพแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส	155
4.3.20 วงจรขยายออพแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส	157
4.3.21 วงจรผลรวม	158
4.3.22 วงจรค่าเฉลี่ย	160
4.3.23 วงจรขยายผลต่าง	161
บทที่ 5 บทสรุปปัญหาและแนวทางแก้ไข	163
5.1 บทสรุป	163
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา	163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
5.3 แนวทางการพัฒนา	164
ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบ	165
ภาคผนวก ข วงจรและแผ่นวงจร	169
ภาคผนวก ค รายละเอียดและคุณสมบัติของอุปกรณ์	197
ภาคผนวก ง ใบงานการทดลอง	205
ภาคผนวก จ คู่มือการใช้งาน	207
บรรณานุกรม	228
ประวัติผู้แต่ง	229



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz	148
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1 ความถี่ 1 kHz	149
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ความถี่ 10 kHz	151
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ความถี่ 10 kHz	153
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ที่ความถี่ 1 kHz	155
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของวงจรผลรวม	159
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองของวงจรค่าเฉลี่ย	161
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองของวงจรค่าผลต่าง	162

## สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	4
รูปที่ 2.2 วงจรอิมิตเตอร์ร่วมบายพาสน์เต็มส่วน	7
รูปที่ 2.3 วงจรบายพาสล์ร่วมแบบบางส่วน	9
รูปที่ 2.4 วงจรขยายเบสร่วม	11
รูปที่ 2.5 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	13
รูปที่ 2.6 วงจรขยายซอร์สร่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสล์เต็มส่วน	15
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลวงจรซอร์สร่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสล์	16
รูปที่ 2.8 วงจรขยายซอร์สร่วมที่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสล์	17
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลวงจรซอร์สร่วมที่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสล์	17
รูปที่ 2.10 วงจรขยายซอร์สร่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสล์บางส่วนแบบ 1	18
รูปที่ 2.11 วงจรขยายแบบซอร์สร่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสล์บางส่วนแบบ 1	18
รูปที่ 2.12 วงจรขยายซอร์สร่วมแบบบายพาสล์บางส่วนแบบที่ 2	19
รูปที่ 2.13 วงจรขยายแบบซอร์สร่วมแบบบายพาสล์บางส่วนความต้านทานอินพุต	20
รูปที่ 2.14 วงจรขยายสัญญาณแบบเกทร่วม	21
รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลวงจรขยายสัญญาณแบบเกทร่วม	21
รูปที่ 2.16 แสดงวงจรขยายเดรนร่วมและวงจรสมมูล	22
รูปที่ 2.17 ตัวขยายผลต่าง	25
รูปที่ 2.18 วงจรขยายผลต่างแบบวิธีผลรวม	26
รูปที่ 2.19 วงจรขยายแบบวิธีผลต่าง	27
รูปที่ 2.20 วงจรขยายแบบวิธีผลรวม	29
รูปที่ 2.21 วงจรพื้นฐานของวงจรขยายผลต่างพื้นฐาน	30
รูปที่ 2.22 วงจรอิมิตเตอร์ร่วมที่ไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกระแส	32
รูปที่ 2.23 ตัวสะท้อนกระแสพื้นฐาน	33
รูปที่ 2.24 คุณลักษณะกระแสต้านเอาต์พุตของตัวสะท้อนกระแสพื้นฐานที่ใช้ BJT	35
รูปที่ 2.25 แหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต	36
รูปที่ 2.26 วงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคด	37
รูปที่ 2.27 วงจรแหล่งจ่ายกระแสแบบคาสโคด	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 2.28 แหล่งจ่ายกระแสโวลต์	40
รูปที่ 2.29 แหล่งจ่ายกระแสโวลต์ที่มีการปรับปรุงแล้ว	42
รูปที่ 2.30 แหล่งจ่ายกระแสโวลต์	43
รูปที่ 2.31 แสดงสัญลักษณ์ของดิฟเฟอเรนเชียลออปแอมป์	44
รูปที่ 2.32 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 แบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน	46
รูปที่ 2.33 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 แบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน	48
รูปที่ 2.34 การวิเคราะห์ส่วนของไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรกรองความถี่อันดับ 2	50
รูปที่ 2.35 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 แบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน	51
รูปที่ 2.36 วงจรกรองแถบความถี่เฉพาะย่านแบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน	53
รูปที่ 2.37 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบ กลับเฟส	55
รูปที่ 2.38 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบ ไม่กลับเฟส	56
รูปที่ 2.39 วงจรขยายผลรวม	58
รูปที่ 2.40 วงจรหาค่าเฉลี่ย	59
รูปที่ 3.1 วงจรขยายอิมิตอร์ร่วมที่ใช้ในการออกแบบ	63
รูปที่ 3.2 วงจรขยายเบสร่วมที่ใช้ในการออกแบบ	67
รูปที่ 3.3 วงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วมที่ใช้ในการออกแบบ	69
รูปที่ 3.4 วงจรขยายซอร์ร่วมที่ใช้ในการออกแบบ	72
รูปที่ 3.5 วงจรขยายเดรนร่วมที่ใช้ในการออกแบบ	75
รูปที่ 3.6 วงจรขยายเกตร่วมที่ใช้ในการออกแบบ	76
รูปที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายกระแสไมลอร์	77
รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่าค่าเอาต์พุต	78
รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายกระแสคาสโคดที่ใช้ในการออกแบบ	79
รูปที่ 3.10 วงจรแหล่งจ่ายกระแสโวลต์ที่ใช้ในการออกแบบ	81
รูปที่ 3.11 วงจรแหล่งจ่ายโวลต์	82
รูปที่ 3.12 วงจรขยายผลต่างที่ใช้พิจารณาในการออกแบบ	84
รูปที่ 3.13 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 3.14 วงจรขยายผลต่างที่ใช้เจเฟต	87
รูปที่ 3.15 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1	89
รูปที่ 3.16 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1	91
รูปที่ 3.17 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2	92
รูปที่ 3.18 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2	94
รูปที่ 3.19 วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่	97
รูปที่ 3.20 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส	98
รูปที่ 3.21 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส	100
รูปที่ 3.22 วงจรผลบวก	101
รูปที่ 3.23 วงจรหาค่าเฉลี่ย	103
รูปที่ 3.24 วงจรขยายผลต่าง	104
รูปที่ 4.1 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	106
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	107
รูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice	107
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice	108
รูปที่ 4.5 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	109
รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	109
รูปที่ 4.7 วงจรขยายเบสร่วม	110
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายเบสร่วม	111
รูปที่ 4.9 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายเบสร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice	111
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเบสร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice	112
รูปที่ 4.11 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายเบสร่วม	113

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถยายเบสร่วม	113
รูปที่ 4.13 วงจรถยายคอลเลคเตอร์ร่วม	114
รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรถยายคอลเลคเตอร์ร่วม	115
รูปที่ 4.15 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายคอลเลคเตอร์ร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice	115
รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถยายคอลเลคเตอร์ร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice	116
รูปที่ 4.17 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายคอลเลคเตอร์ร่วม	117
รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถยายคอลเลคเตอร์ร่วม	117
รูปที่ 4.19 วงจรถยายซอสร่วม	118
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรถยายซอสร่วม	119
รูปที่ 4.21 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายซอสร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice	119
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถยายซอสร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice	120
รูปที่ 4.23 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายซอสร่วม	121
รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถยายซอสร่วม	121
รูปที่ 4.25 วงจรถยายเดรนร่วม	122
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรถยายเดรนร่วม	123
รูปที่ 4.27 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายเดรนร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice	123
รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถยายเดรนร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice	124
รูปที่ 4.29 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายเดรนร่วม	125
รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรถยายเดรนร่วม	125
รูปที่ 4.31 วงจรถยายเกทร่วม	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายเกทร่วม	127
รูปที่ 4.33 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายเกทร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม Pspice	127
รูปที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเกทร่วม โดยใช้โปรแกรม Pspice	128
รูปที่ 4.35 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายเกทร่วม	129
รูปที่ 4.36 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเกทร่วม	129
รูปที่ 4.37 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์	130
รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายผลต่าง ที่ใช้ทรานซิสเตอร์	131
รูปที่ 4.39 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ ในกรณีวิธีผลต่างที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม Pspice	131
รูปที่ 4.40 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ ในกรณีวิธีผลต่างที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม Pspice	132
รูปที่ 4.41 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ กรณีวิธีผลต่าง	133
รูปที่ 4.42 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ กรณีวิธีผลรวม	134
รูปที่ 4.43 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	135
รูปที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายผลต่าง ที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	136
รูปที่ 4.45 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ในกรณีวิธีผลต่างที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม Pspice	136
รูปที่ 4.46 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ในกรณีวิธีผลต่างที่ได้จากการวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรม Pspice	137

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.47 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า กรณีวิธีผลต่าง	138
รูปที่ 4.48 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า กรณีวิธีผลรวม	139
รูปที่ 4.49 วงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์	139
รูปที่ 4.50 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์ด้วยโปรแกรม Pspice	140
รูปที่ 4.51 วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่าหนึ่งเอาต์พุต	141
รูปที่ 4.52 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่าหนึ่งเอาต์พุต ด้วยโปรแกรม Pspice	142
รูปที่ 4.53 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคดด้วยโปรแกรม Pspice	143
รูปที่ 4.54 วงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคด	143
รูปที่ 4.55 วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลสัน	144
รูปที่ 4.56 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลสันด้วยโปรแกรม Pspice	145
รูปที่ 4.57 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลดาร์ด้วยโปรแกรม Pspice	146
รูปที่ 4.58 วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลดาร์	146
รูปที่ 4.59 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz	147
รูปที่ 4.60 ผลการวิเคราะห์ของวงจรถองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice	147
รูปที่ 4.61 ผลการทดลองวงจรถองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz	148
รูปที่ 4.62 วงจรถองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz	148
รูปที่ 4.63 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรถองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice	149
รูปที่ 4.64 ผลการทดลองของวงจรถองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz	150
รูปที่ 4.65 วงจรถองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz	150
รูปที่ 4.66 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรถองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice	151

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.67 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz	152
รูปที่ 4.68 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz	152
รูปที่ 4.69 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice	153
รูปที่ 4.70 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz	153
รูปที่ 4.71 วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ ที่ความถี่ 1 kHz	154
รูปที่ 4.72 ผลการวิเคราะห์วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ ที่ความถี่ 1 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice	154
รูปที่ 4.73 ผลการทดลองของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ ที่ความถี่ 1 kHz	155
รูปที่ 4.74 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส	155
รูปที่ 4.75 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับ แบบกลับเฟสที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Pspice	156
รูปที่ 4.76 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับ แบบกลับเฟส	156
รูปที่ 4.77 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส	157
รูปที่ 4.78 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับ แบบไม่กลับเฟสที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Pspice	157
รูปที่ 4.79 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับ แบบไม่กลับเฟส	158
รูปที่ 4.80 วงจรผลรวม	158
รูปที่ 4.81 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรผลรวมที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม Pspice	159
รูปที่ 4.82 วงจรค่าเฉลี่ย	160
รูปที่ 4.83 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรม Pspice	160
รูปที่ 4.84 วงจรขยายผลต่าง	161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.85 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Pspice	162
รูปที่ ก.1 ชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว	166
รูปที่ ก.2 ชุดทดลอง	166
รูปที่ ก.3 ตู้เก็บบอร์ดทดลอง	167
รูปที่ ก.4 ตัวอย่างบอร์ดทดลอง	167
รูปที่ ก.5 ตัวอย่างแผ่นวงจรพิมพ์	168
รูปที่ ข.1 ชุดทดลองวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	170
รูปที่ ข.2 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม	170
รูปที่ ข.3 ชุดทดลองวงจรขยายเบสร่วม	171
รูปที่ ข.4 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายเบสร่วม	171
รูปที่ ข.5 ชุดทดลองวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วม	172
รูปที่ ข.6 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายคอลเล็กเตอร์ร่วม	172
รูปที่ ข.7 ชุดทดลองวงจรขยายซอสร่วม	173
รูปที่ ข.8 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายซอสร่วม	173
รูปที่ ข.9 ชุดทดลองวงจรขยายเกทร่วม	174
รูปที่ ข.10 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายเกทร่วม	174
รูปที่ ข.11 ชุดทดลองวงจรขยายเดรนร่วม	175
รูปที่ ข.12 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายเดรนร่วม	175
รูปที่ ข.13 ชุดทดลองวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์	176
รูปที่ ข.14 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์	176
รูปที่ ข.15 ชุดทดลองวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	177
รูปที่ ข.16 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	177
รูปที่ ข.17 ชุดทดลองวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	178
รูปที่ ข.18 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	178
รูปที่ ข.19 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์	179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ ข.20 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์	179
รูปที่ ข.21 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	180
รูปที่ ข.22 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	180
รูปที่ ข.23 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต	181
รูปที่ ข.24 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุตวงจร	181
รูปที่ ข.25 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต โดยใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	182
รูปที่ ข.26 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต โดยใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	182
รูปที่ ข.27 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคด	183
รูปที่ ข.28 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคด	183
รูปที่ ข.29 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคดที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	184
รูปที่ ข.30 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคดที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	184
รูปที่ ข.31 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลสัน	185
รูปที่ ข.32 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลสัน	185
รูปที่ ข.33 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลสันที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	186
รูปที่ ข.34 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลสันที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	186
รูปที่ ข.35 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์	187
รูปที่ ข.36 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์	187
รูปที่ ข.37 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	188
รูปที่ ข.38 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์	188
รูปที่ ข.39 ชุดทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1	189
รูปที่ ข.40 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1	189
รูปที่ ข.41 ชุดทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2	190
รูปที่ ข.42 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2	190
รูปที่ ข.43 ชุดทดลองวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1	191

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ ข.44 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1	191
รูปที่ ข.45 ชุดทดลองวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2	192
รูปที่ ข.46 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2	192
รูปที่ ข.47 ชุดทดลองวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่	193
รูปที่ ข.48 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่	193
รูปที่ ข.59 ชุดทดลองวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟส	194
รูปที่ ข.50 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟส	194
รูปที่ ข.51 ชุดทดลองวงจรผลรวมและวงจรถ่ายค่าเฉลี่ย	195
รูปที่ ข.52 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรผลรวมและวงจรถ่ายค่าเฉลี่ย	195
รูปที่ ข.53 ชุดทดลองวงจรขยายผลต่างโดยใช้ออปแอมป์	196
รูปที่ ข.54 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายผลต่างโดยใช้ออปแอมป์	196
รูปที่ จ.1 บอร์ดทดลอง	208
รูปที่ จ.2 แผงทดลอง	209
รูปที่ จ.3 ตู้ใส่แผงทดลอง	210
รูปที่ จ.4 โครงสร้างของ Design Center	211
รูปที่ จ.5 เมนูหลักต่าง ๆ ของโปรแกรม Pspice หลังจากเรียกโปรแกรม Schematics	213
รูปที่ จ.6 รายละเอียดของเมนู File และ Edit	214
รูปที่ จ.7 รายละเอียดของเมนู Draw และ Analysis	215
รูปที่ จ.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice	217
รูปที่ จ.9 (ก) ตัวอย่างการกำหนดค่าความต้านทาน	
(ข) ตัวอย่างการกำหนดค่าใช้แหล่งจ่าย VSIN	218
รูปที่ จ.10 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมหลังจากวาดในขั้นตอนที่ 1	219
รูปที่ จ.11 การเลือกการวิเคราะห์	219
รูปที่ จ.12 การเลือกวิเคราะห์แบบ AC Sweep	220

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ จ.13 การเลือกวิเคราะห์แบบ Transient	221
รูปที่ จ.14 หน้าต่างหลังจากการ Simulate	221
รูปที่ จ.15 ผลจากการเลือกวิเคราะห์แบบ AC และ เลือก Trace และ Add	222
รูปที่ จ.16 ผลจากการเลือกวิเคราะห์แบบ AC และ เลือก Trance และ Add	223
รูปที่ จ.17 การเลือกเมนู PLOT และการเลือกการวิเคราะห์แบบ Transient	224
รูปที่ จ.18 รูปสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ความถี่จาก 1 kHz	224
รูปที่ จ.19 กำหนดโนดต่างๆ เพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งของอุปกรณ์	226
รูปที่ จ.20 เพิ่มข้อมูลที่ได้จากบรรยายวงจรด้วยข้อความ	226
รูปที่ จ.21 หน้าต่างโปรแกรม Pspice	227

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปริญญาโท

เนื่องจากในปัจจุบัน อิเล็กทรอนิกส์มีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก ซึ่งเครื่องใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่ต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการทำงานนั้นและในการศึกษาได้ให้ความสำคัญกับวิชาอิเล็กทรอนิกส์มาก ได้มีการศึกษาที่มีความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับวิชาอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมากดังนั้นผู้จัดทำจึงเล็งเห็นว่าในการศึกษาต้องมีการเรียนทฤษฎีและปฏิบัติซึ่งการเรียนทฤษฎีนักศึกษาจะได้ความรู้ทางด้านการคำนวณและการวิเคราะห์ซึ่งสามารถที่จะเข้าใจได้อย่างชัดเจนเหมือนกับปฏิบัติ ผู้จัดทำมีแนวความคิดว่า การปฏิบัติหรือการทดลองของนักศึกษา ถ้ามีชุดทดลองที่มีคุณภาพจะสามารถทำให้นักศึกษามีความรู้อย่างมากขึ้น มีความเข้าใจในการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ดียิ่งขึ้น มีทักษะ รู้จักการวิเคราะห์ และรู้จักการใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการวัดค่าต่างๆตามใบงานอีกประการหนึ่งจะช่วยให้อาจารย์ได้มีชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัวใช้เป็นการเรียนการสอนที่มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น

### 1.2 ขีดความสามารถของโครงการ

- 1) ใช้เป็นชุดการทดลองปฏิบัติงานแยกแต่ละหน้าที่ได้
- 2) สามารถนำชุดทดลองมาประกอบเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ขนาดใหญ่ได้
- 3) มีใบงานประกอบการทดลองทุกวงจร
- 4) สามารถใช้โปรแกรมบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อทำการศึกษาการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้

### 1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

เนื้อหาในปริญญาโทฉบับนี้แบ่งออกเป็นบทต่างๆเพื่อความสะดวกต่อการศึกษาค้นคว้าและการทำความเข้าใจ ในแต่ละบทในปริญญาโทฉบับนี้ซึ่งจะประกอบด้วยเนื้อหา ดังต่อไปนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ ประกอบด้วยเนื้อหาในทางทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งได้แก่ ทฤษฎีทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า วงจรขยายต่างๆ วงจรกรองความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3 จำนวนและการออกแบบ ของทฤษฎีทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า วงจรขยายต่าง ๆ วงจรรองความถี่ การออกแบบจะเป็นแผ่นวงจรที่ทำการประกอบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์หน้าทีซึ่งแต่ละหน้าทีจะมีช่องเสียบที่มีขนาดเท่ากันและตรงกันกับช่องเสียบภายในบอร์ด ซึ่งหน้าทีแต่ละหน้าทีที่ทำมาปฏิบัติการนั้นผ่านการทดสอบและการคำนวณค่าอย่างละเอียดแล้ว และในแผ่นวงจรแต่ละหน้าทีจะมีจุดทดสอบสัญญาณ เพื่อทำการทดสอบสัญญาณ

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง ประกอบด้วยการทดลองและผลการทดลองวงจรทฤษฎีทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ และ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า วงจรขยายต่าง ๆ วงจรรองความถี่ โดยการทดลองจะต้องใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ คอมพิวเตอร์ ฟังก์ชันเจเนอเรเตอร์ ออสซิลโลสโคป มัลติมิเตอร์ ในการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุป ปัญหา แนวทางการแก้ไข และการพัฒนา ขึ้นการสรุปผลในการจัดทำโครงการปัญหาที่เกิดขึ้น และได้เสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหาพร้อมทั้งการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบ

ภาคผนวก ข วงจรและแผ่นวงจรพิมพ์

ภาคผนวก ค รายละเอียดของอุปกรณ์

ภาคผนวก ง ใบงานการทดลอง

ภาคผนวก จ คู่มือประกอบการใช้งาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์

ในปี ค.ศ. 1947 วาล์เตอร์ บรัทเทอร์น และจอห์น บาร์ดีน ซึ่งทำให้ในห้วงการทดลองของเบล เขาทั้งสองได้พยายามสร้างทรานซิสเตอร์ขึ้นมา โดยใช้โลหะปลายแหลมฝังลงในผลึกเจอร์มาเนียม โลหะทั้งสองเรียกว่า อิเล็กโทรด ซึ่งต่อมาเรียกขาอิมิตเตอร์และขาคอลเลคเตอร์ ส่วนขาเบส ซึ่งเป็นขาที่สามถูกต่อกับผลึกเจอร์มาเนียม โดยเขาทั้งสองได้ทดลองและแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันคอลเลคเตอร์ และจากการทดลองดังกล่าวนี้ พบว่ากระแสทางด้านอินพุต (เบสหรืออิมิตเตอร์) สามารถใช้ควบคุมแรงดันเอาต์พุตได้ และเขาได้อธิบายนิยามของอัตราขยายของอุปกรณ์ในสมัยนั้นไว้ว่า อัตราการขยาย ซึ่งหาได้จาก

$$CMRR = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \text{ dB} \quad (2.1)$$

ดังนั้น อัตราการขยายในสมการที่ (2.1) จึงมีหน่วยเป็นโอห์ม ต่อมา J.R.Pierce (ของห้องทดลองเบล) ได้อธิบายว่าเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็น ตัวต้านทานโอนย้าย (Transfer Resistor) และเห็นว่าเป็นลักษณะเฉพาะพิเศษ จึงตั้งชื่อใหม่ใช้ภาษาอังกฤษพยางค์หน้าของ “Transfer” กับสองพยางค์หลังของ “Resistor” มารวมกันเป็น “Trans Resistor” และใช้ชื่อนี้มาจนกระทั่งปัจจุบัน

#### 2.2 ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า หรือเรียกโดยย่อว่า เฟต (Field Effect Transistor : FET ) เป็นอุปกรณ์โซลิตสเตรตชนิดหนึ่ง ที่มีการทำงานโดยใช้สนามไฟฟ้าควบคุมการไหลของประจุผ่านช่องนำพาหะ โดยเรียกช่องนำพาหะว่า แชนแนล และทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้ายังแบ่งตามโครงสร้างได้ 2 ประเภท คือ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบ เกตรอยต่อ และทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเกตกันฉนวนสำหรับทรานซิสเตอร์แบบเกตรอยต่อสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ประเภท คือ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดรอยต่อ หรือเรียกโดยย่อว่า เจเฟต และทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าชนิดโลหะสารกึ่งตัวนำหรือเรียกโดยย่อว่า เมสเฟต (Metal Semiconductor FET : MESFET) โดยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

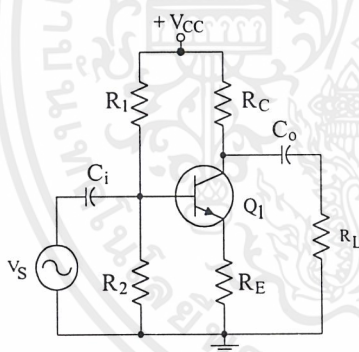
เจฟต์สามารถแบ่งตามคุณสมบัติของเซนแนลได้ 2 เซนแนล คือ เจฟต์เซนแนลเอ็น และ เจฟต์เซนแนลพี สำหรับทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแบบเกตคั่นฉนวน มักจะเรียกว่า มอสเฟต และสามารถแบ่งย่อยได้ 2 ประเภทคือ มอสเฟตแบบเพิ่มพูน และ มอสเฟตแบบลดพาหะ และมอสเฟตทั้งสองประเภทนี้ ยังสามารถแบ่งตามคุณสมบัติของเซนแนลได้ 2 ชนิดคือ มอสเฟตเซนแนลเอ็น และ มอสเฟตเซนแนลพี

### 2.3 วงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์

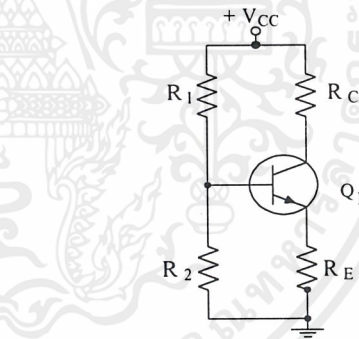
วงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ วงจรขยายอิมิเตอร์ร่วม วงจรขยายเบสร่วม และ วงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ของแต่ละวงจรมีดังต่อไปนี้

#### 2.3.1 วงจรขยายอิมิเตอร์ร่วม

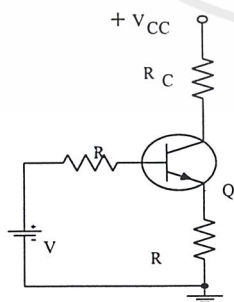
วงจรขยายอิมิเตอร์ร่วม คือ วงจรที่ใช้ทรานซิสเตอร์โดยวางให้ขาอิมิเตอร์เป็นจุดร่วมของวงจรทางด้านอินพุตและเอาต์พุต วงจรขยายลักษณะนี้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง ส่วนการไบแอสวงจรอิมิเตอร์ร่วมมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือวิธีแบ่งแรงดันดังแสดงในรูปที่ 2.1



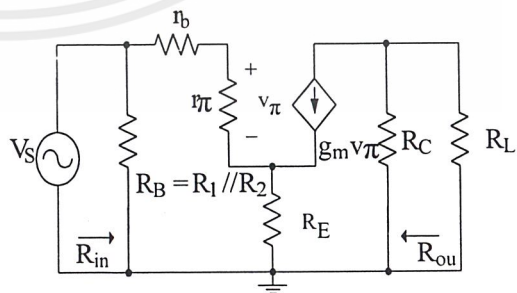
(ก) วงจรไบแอสแบบแบ่งแรงดัน



(ข) วงจรที่แทนตัวเก็บประจุด้วยวงจรเปิด



(ค) การวิเคราะห์ด้วยเทวินิน



(ง) วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็ก

รูปที่ 2.1 วงจรขยายอิมิเตอร์ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมดังรูปที่ 2.1 (ก) จะเป็นวงจรที่มีการไบแอสแบบแบ่งแรงดันซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพการทำงานในสภาวะสงบให้คงที่มากยิ่งขึ้นการวิเคราะห์ห้วงจรเพื่อหาจุดทำงานของวงจรสามารถกระทำได้โดยแทนตัวเก็บประจุด้วยวงจรมืดจะได้วงจรดังรูปที่ 2.1 (ข)

### 1) วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมแบบไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์

#### 1.1) การวิเคราะห์ห้วงจรทางด้านแรงดันไฟตรง

การวิเคราะห์ห้วงจรเพื่อหาจุดทำงานของวงจรจะใช้ทฤษฎีเทวินินเพื่อแปลงวงจรให้อยู่ในลักษณะดังรูปที่ 2.1 (ค) โดยที่ค่าของ  $R_B$  และ  $V_B$  มีค่าดังนี้

$$V_B = \frac{V_{CC}R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.2)$$

$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.3)$$

นำค่า  $V_B$  และ  $R_B$  มาเขียนเป็นวงจรใหม่ได้ดังรูปที่ 2.1 (ค) และสามารถหาจุดทำงานของวงจรทางด้านอินพุตโดยทฤษฎีกระแสเคอร์ชอฟฟ์จะได้

$$I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_{BB} + (1 + \beta)R_E} = I_{BQ} \quad (2.4)$$

ดังนั้นสามารถหาค่า  $I_{CQ}$  ได้จาก

$$I_{CQ} = I_{BQ} \quad (2.5)$$

$$I_{CQ} = \left[ \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB} + (1 + \beta)R_E} \right] \quad (2.6)$$

และหา  $V_{CEQ}$  ได้จากสมการเอาต์พุตโดยใช้ทฤษฎีกระแสเคอร์ชอฟฟ์ คือ

$$V_{CEQ} = V_{CC} - V_{RC} - V_{RE} \quad (2.7)$$

$$= V_{CC} - I_C R_C - (I_C + I_B) R_E$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2) การวิเคราะห์วงจรทางด้านแรงดันไฟตรง

การวิเคราะห์แบบนี้เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่กลางของวงจร ดังนั้นจะต้องลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันคงที่และลัดวงจรตัวเก็บประจุในวงจรแล้วแทนทรานซิสเตอร์ด้วยวงจรสมมูลย์ซึ่งจะได้วงจรสมมูลย์ทั้งหมดและหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลย์ทรานซิสเตอร์โดยใช้ข้อมูล  $I_{CQ}$  ดังนั้นจะทราบว่า

$$r_{\pi} = \frac{V_T}{I_{BQ}} = \frac{V_T}{I_{CQ}} \beta \quad (2.8)$$

$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} \quad (2.9)$$

วิเคราะห์หาคคุณสมบัติของวงจรขยายที่ตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่กลาง โดยคุณสมบัติที่สำคัญมีดังนี้

ความต้านทานอินพุต ( $R_{in}$ )

$$R_{in} = R_B // [r_b + r_{\pi} + (1 + \beta)R_E] \quad (2.10)$$

ความต้านทานเอาต์พุต ( $R_{out}$ )

$$R_{out} = R_C \quad (2.11)$$

อัตราขยายแรงดัน ( $A_V$ )

$$A_V = \frac{-\beta \cdot (R_C // R_L)}{r_b + r_{\pi} + (1 + \beta)R_E} \quad (2.12)$$

อัตราขยายกระแส ( $A_i$ )

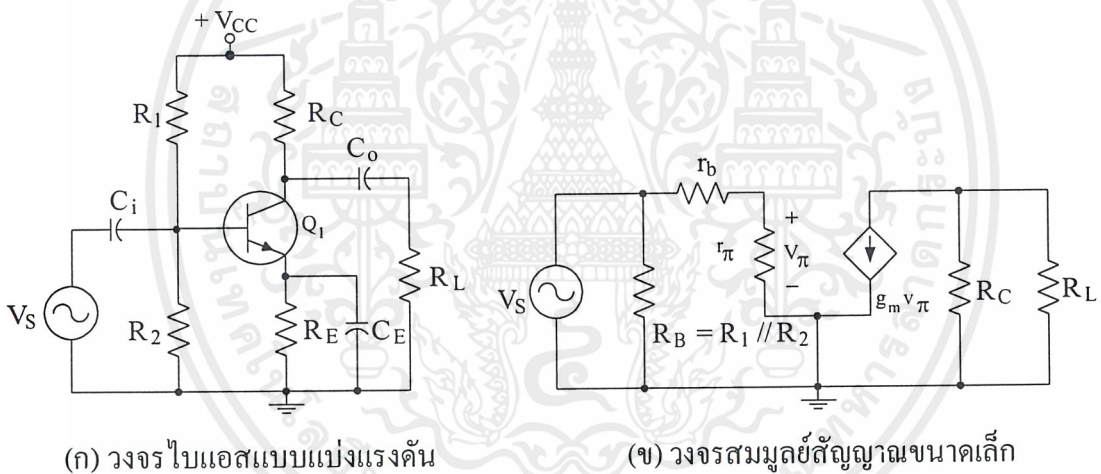
$$A_i = \frac{R_B}{R_B + [r_b + r_{\pi} + (1 + \beta)R_E]} \beta \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมแบบมีตัวเก็บประจุบายพาสส์

จากการวิเคราะห์อัตราขยายของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมแบบไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์ ทำให้เทอมส่วนของ  $(1 + \beta)R_E$  รวมอยู่ด้วย เป็นผลทำให้อัตราการขยายลดลง อย่างไรก็ตาม  $R_E$  ก็มีความสำคัญในการทำให้วงจรมีเสถียรภาพแรงไฟกระแสตรง ดังนั้น เพื่อต้องการให้  $R_E$  มีผลต่ออัตราการขยายสัญญาณขนาดเล็กน้อยที่สุดจึงใช้ตัวเก็บประจุบายพาสส์สัญญาณเอซีจากขาอิมิตเตอร์ลงกราวด์โดยไม่ตกคร่อมที่  $R_E$  จึงเสมือนการลัดวงจร  $R_E$  ดังนั้นทำให้อัตราการขยายสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น และยังทำให้วงจรมีเสถียรภาพด้านแรงไฟกระแสตรงด้วย วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์มี 2 แบบ คือ วงจรอิมิตเตอร์ร่วมที่บายพาสส์เต็มส่วน และ วงจรอิมิตเตอร์ร่วมที่บายพาสส์บางส่วน

### 2.1) วงจรอิมิตเตอร์ร่วมแบบส่งผ่านทั้งหมด



รูปที่ 2.2 วงจรอิมิตเตอร์ร่วมบายพาสส์เต็มส่วน

การวิเคราะห์ห้วงจรจากวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.2 (ข) จะได้สมการดังนี้

ความต้านทานอินพุต

$$R_{in} = R_B // (r_b + r_\pi) \quad (2.14)$$

ความต้านทานเอาต์พุต

$$R_{out} = R_C \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายแรงดัน

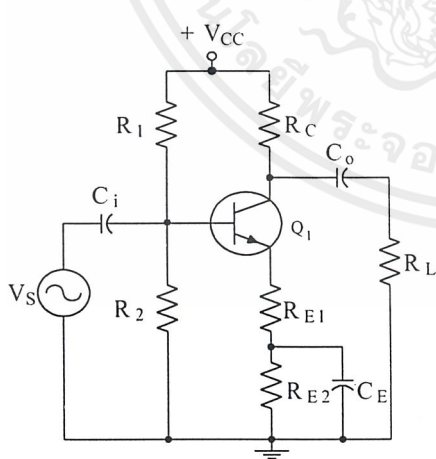
$$A_v = \frac{\beta \cdot (R_C \parallel R_L)}{r_b + r_{\pi}} \tag{2.16}$$

อัตราขยายกระแส

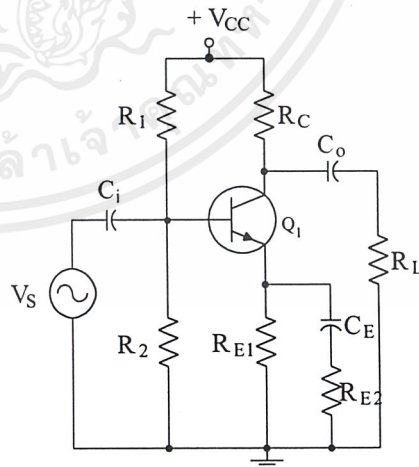
$$A_i = \frac{\beta \cdot R_B}{R_B + r_b + r_{\pi}} \tag{2.17}$$

2.2) วงจรขยายอิมิตอร์ร่วมบายพาสส์บางส่วน

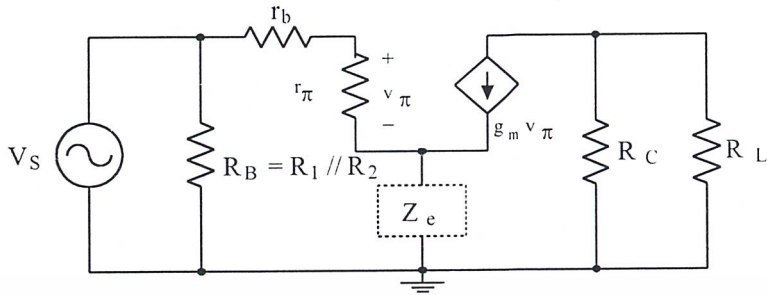
วงจรขยายอิมิตอร์ร่วมบายพาสส์บางส่วน คือ การบายพาสส์สัญญาณของวงจรอิมิตอร์เพียงบางส่วนเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อไม่ให้อัตราขยายลดลงมากนัก และในทางกลับกันก็ต้องรักษาเสถียรภาพการไบแอสด้วยไฟกระแสตรงให้ดีขึ้น ลักษณะวงจรขยายอิมิตอร์ร่วมบายพาสส์บางส่วนมีหลายแบบด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 และสามารถเขียนวงจรมูลฐานในรูปทั่วไปได้ดังรูปที่ 2.3 (ก) โดยที่  $Z_e$  ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของวงจรอิมิตอร์ตามรูปที่ 2.3 (ง) สังเกตว่ารูปลักษณะของวงจรดังรูปที่ 2.3 (ง) จะเสมือนกับวงจรขยายอิมิตอร์ร่วมแบบไม่มีการบายพาสส์ ดังนั้นสมการต่างๆ จะเหมือนกันเพียงแต่แทน  $R_E$  ด้วย  $Z_e$



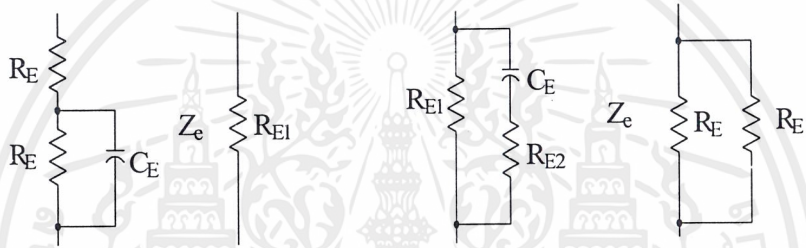
(ก) วงจรขยายอิมิตอร์ร่วมบายพาสส์  
บางส่วนแบบ 1



(ข) วงจรขยายอิมิตอร์ร่วมบายพาสส์  
บางส่วนแบบ 2



(ค) วงจรสมมูลยี่สัญญาณขนาดเล็ก



(ง)  $Z_e$  ของวงจรบายพาสส์ร่วมบางส่วน

รูปที่ 2.3 วงจรบายพาสส์ร่วมแบบบางส่วน

จากวงจรในรูปที่ 2.3 ได้สมการดังนี้  
ความต้านทานอินพุต

$$R_{in} = R_B // [r_b + r_{\pi} + (1 + \beta)Z_e] \tag{2.18}$$

- ความต้านทานเอาต์พุต

$$R_{out} = R_C \tag{2.19}$$

อัตราขยายแรงดัน

$$A_V = \frac{\beta \cdot (R_C // R_L)}{r_b + r_{\pi} + (1 + \beta)Z_e} \tag{2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายกระแส

$$A_i = \frac{\beta \cdot R_B}{R_B + [r_b + r_\pi + (1 + \beta)Z_e]} \quad (2.21)$$

### 2.3.2 วงจรขยายเบสรวม

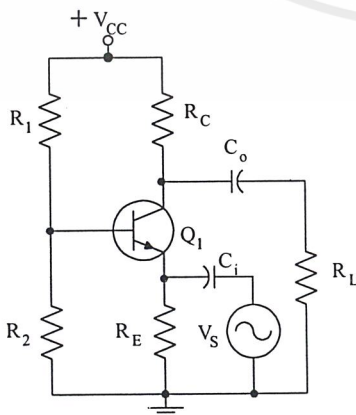
วงจรถ่ายเบสรวมเป็นวงจรถ่ายที่มีลักษณะพื้นฐานดังรูปที่ 2.3 (ก) ใช้เบสเป็นจุดร่วมของสัญญาณขนาดเล็กทางด้านอินพุตและเอาต์พุต เป็นวงจรถ่ายพื้นฐานอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านการขยายแรงดัน ซึ่งมีรายละเอียดคุณสมบัติต่าง ๆ จากการวิเคราะห์วงจรทั้งแบบวิธีไฟกระแสตรงและไฟกระแสสลับดังนี้

#### 1) การวิเคราะห์วงจรในแบบแรงดันไฟตรง

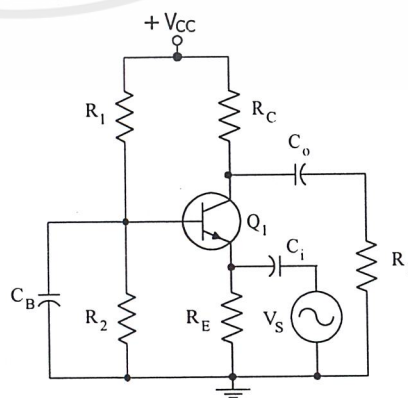
การวิเคราะห์ในแบบวิธีไฟกระแสตรงของวงจรถ่ายเบสรวมจะมีการวิเคราะห์เช่นเดียวกับวงจรถ่ายอิมิตเตอร์รวมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

#### 2) การวิเคราะห์วงจรในแบบแรงดันไฟสลับ

เป็นการวิเคราะห์วงจรถ่ายสัญญาณขนาดเล็ก ดังนั้นจะต้องตั้งวงจรตัวเก็บประจุ และเขียนแทนด้วยวงจรถ่ายสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.4 (จ) จะเห็นว่าวงจรถ่ายเบสรวมอาจแบ่งได้หลายแบบ เช่นเดียวกับวงจรถ่ายอิมิตเตอร์รวม โดยขึ้นอยู่กับ  $Z_B$  ในการใช้งานโดยทั่วไป วงจรถ่ายเบสรวมจะอยู่ในรูปแบบบายพาสส์ทั้งหมด ซึ่งอัตราขยายแรงดันของวงจรถ่ายเบสรวมแบบบายพาสส์ทั้งหมด จะมีค่าเท่ากับอัตราขยายแรงดันของวงจรถ่ายอิมิตเตอร์รวมแบบบายพาสส์ทั้งหมด โดยที่คุณสมบัติโดยทั่วไปของวงจรถ่ายเบสรวม คือ

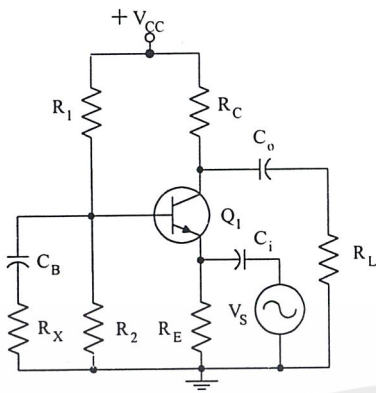


(ก) วงจรถ่ายเบสรวมแบบไม่บายพาสส์

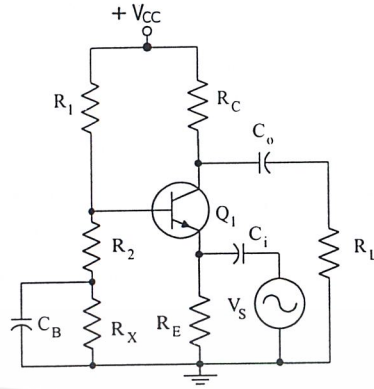


(ข) วงจรถ่ายเบสรวมแบบบายพาสส์ทั้งหมด

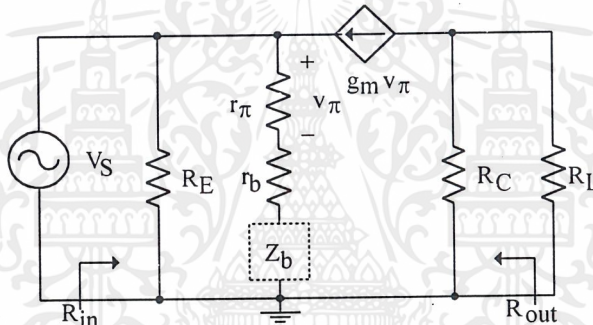
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) วงจรขยายเบสร่วมแบบบายพาสส์  
บางส่วนแบบ 1



(ง) วงจรขยายเบสร่วมแบบบายพาสส์  
บางส่วนแบบ 2



(จ) วงจรสมมูลยี่สัญลักษณ์ขนาดเล็ก

รูปที่ 2.4 วงจรขยายเบสร่วม

ความต้านทานอินพุต

$$R_{in} = R_E \parallel \frac{(r_b + r_{\pi} + Z_B)}{1 + \beta} \tag{2.22}$$

ความต้านทานเอาต์พุต

$$R_{out} = R_C \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายแรงดัน

$$A_V = \frac{\beta(R_C // R_L)}{r_b + r_\pi + Z_B} \quad (2.24)$$

อัตราขยายกระแส

$$A_i = g_m [R_E // \frac{(r_b + r_\pi + Z_B)}{1 + \beta}] \quad (2.25)$$

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าค่า  $Z_B$  จะมีค่าแตกต่างกันไปตามรูปแบบของการจัดวงจรโดยที่ค่า  $Z_B$  มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

วงจรรูปที่ 2.4 (ก)  $Z_B = 0$

วงจรรูปที่ 2.4 (ข)  $Z_B = R_1 // R_2 // R_X$

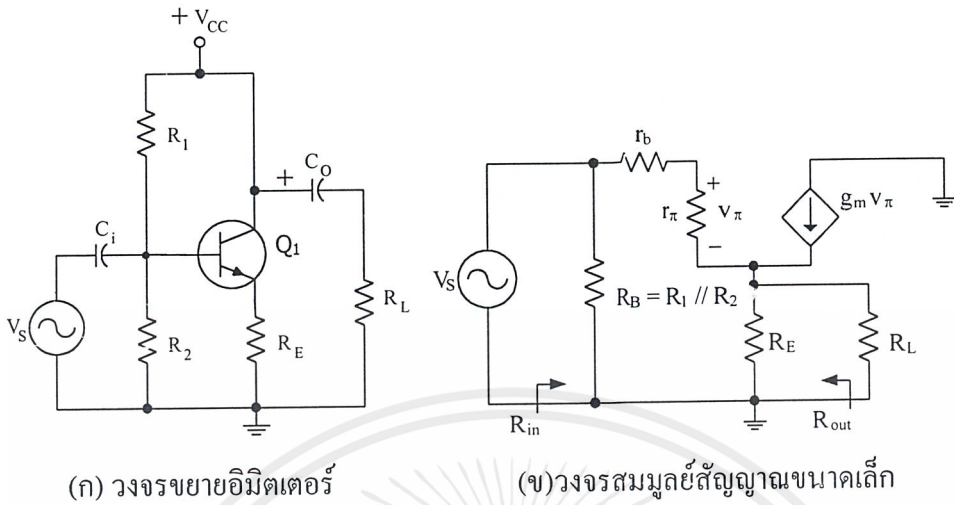
วงจรรูปที่ 2.4 (ค)  $Z_B = R_1 // R_2$

### 2.3.3 วงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม

วงจรคอลเลกเตอร์ร่วม มีลักษณะดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมีลักษณะคล้ายวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม ต่างกันตรงที่วงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วมไม่มี  $R_C$  และเอาต์พุตออกทางขาอิมิตเตอร์ ซึ่งสังเกตว่าแรงดันระหว่างอินพุตที่ขาเบส และเอาต์พุตที่ขาอิมิตเตอร์ต่างกันประมาณ  $V_{BE}$  ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตจึงมีค่าประมาณแรงดันอินพุต แต่ไม่เกินแรงดันอินพุต จึงเสมือนว่าวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วมมีแรงดันเอาต์พุตตามแรงดันอินพุต จึงมีชื่อเรียกวงจรนี้อีกชื่อหนึ่งว่า วงจรตามแรงดันอิมิตเตอร์ (Emitter follower) และวงจรมีความต้านทานเอาต์พุตต่ำ อัตราขยายสูง จึงนิยมใช้เป็นวงจรขยายกันชน (Buffer Amplifier)

#### 1) การวิเคราะห์วงจรในทางไฟฟ้ากระแสตรง

การวิเคราะห์วงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วมที่มีไบแอสแบบแบ่งแรงดันซึ่งเราสามารถวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติต่างๆ ได้เช่นเดียวกับวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมและวงจรขยายเบสร่วมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



(ก) วงจรขยายอิมิตเตอร์

(ข) วงจรสมมูลยส์ัญญาณขนาดเล็ก

รูปที่ 2.5 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

2) การวิเคราะห์ในทางไฟกระแสสลับ

การวิเคราะห์วงจรแบบนี้เพื่อหาคคุณสมบัติของวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วมที่ตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็กด้านอินพุตเช่นเดียวกับวงจรขยายเบสร่วมและอิมิตเตอร์ร่วม ซึ่งการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ มีดังนี้

จากรูปที่ 2.5 (ก) เมื่อลัดวงจรตัวเก็บประจุแล้วแทนด้วยวงจรสมมูลยส์ัญญาณขนาดเล็กจะไ้ตั้งรูปที่ 2.5 (ข) จากวงจรนี้จะได้

ความต้านทานอินพุต

$$R_{in} = R_B // [r_b + r_{\pi} + (1 + \beta)(R_E // R_L)] \tag{2.26}$$

ความต้านทานเอาต์พุต

$$R_{out} = R_E // \frac{(r_b + r_{\pi})}{1 + \beta} \tag{2.27}$$

อัตราขยายแรงดัน

$$A_v = \frac{1}{1 + \frac{r_b + r_{\pi}}{(1 + \beta)(R_E // R_L)}} \tag{2.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายกระแส

$$A_i = \left[ \frac{(1 + \beta) \cdot R_B}{r_b + r + (1 + \beta) \cdot (R_E // R_L) + R_B} \right] \left( \frac{R_E}{R_E + R_L} \right) \quad (2.29)$$

## 2.4 ตัวขยายสัญญาณที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้เจเฟต

ตัวขยายสัญญาณที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า มีขบวนการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของวงจรที่ตอบสนองกับสัญญาณขนาดเล็ก เช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ คือใช้วงจรทรานซิสเตอร์ที่ทำงานในแบบวิธีไวงานไปหน้าและเพื่อให้เข้าใจคุณสมบัติของวงจรถายสัญญาณขนาดเล็ก ที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าได้ดีขึ้น จะแยกพิจารณาคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าแต่ละชนิดดังต่อไปนี้

### 2.4.1 วงจรถายขยายขอสรร่วม

การวิเคราะห์ห้วงจรถายสัญญาณขนาดเล็ก จะเหมือนกับการวิเคราะห์ของตัวขยายที่ใช้ไบโพลาร์ คือ จะต้องลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ หรือเปิดแหล่งจ่ายกระแสคงที่ และลัดวงจรตัวเก็บประจุในวงจร หลังจากนั้นแทนวงจรสมมูลย์ของเจเฟต และต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ของวงจรเข้ากับวงจรสมมูลย์เจเฟต จากนั้น ใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ห้วงจรไฟฟ้าและโครงข่ายมาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติของความต้านทานอินพุต อัตราขยายแรงดัน, และความต้านทานเอาต์พุต

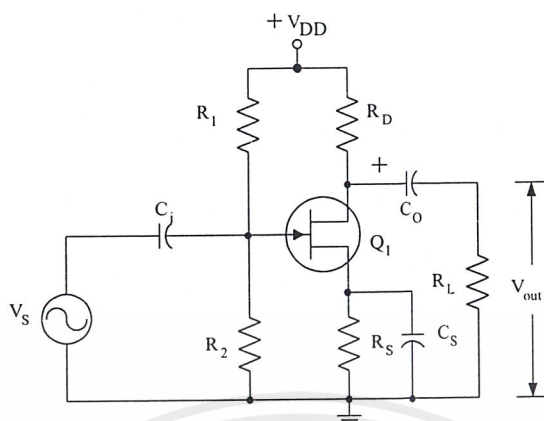
#### 1) วงจรถายขยายแบบขอสรร่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสน์เต็มส่วน

จากรูปที่ 2.6 เป็นวงจรถายขยายขอสรร่วมใช้เจเฟตเซนแนลเอ็นและมีตัวเก็บประจุบายพาสส์ที่ขาซอส การวิเคราะห์ห้วงจรเพื่อหาอัตราขยายแรงดันสัญญาณขนาดเล็กหรือคุณสมบัติอื่นได้ จะต้องวิเคราะห์แบบวิธีดีซีเป็นอันดับแรก เพื่อหาจุดทำงานหรือเพื่อหา  $I_{DQ}$  และ  $V_{GSQ}$  ในการนำไปหาค่า gm ดังนั้น จึงแบ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์เป็นสองขั้นตอนดังนี้

#### 1.1) การวิเคราะห์ห้วงจรในแบบแรงดันไฟตรง

การวิเคราะห์ห้วงจรในแบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวเก็บประจุ  $C_p$ ,  $C_o$ , และ  $C_s$  ออกจากวงจรจะได้

$$V_{GSQ} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{DD} - I_{DQ} R_S \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.6 วงจรขยายขอสรรมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์เต็มส่วน

โดยที่

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GSQ}}{V_P} \right)^2 \quad (2.31)$$

จากนั้นเลือก  $V_{GSQ}$  โดยเลือกค่า  $|V_{GS}| < |V_P|$  แล้วนำไปแทนในสมการ  $I_{DQ}$  ก็สามารถหาค่า  $I_{DQ}$  ได้

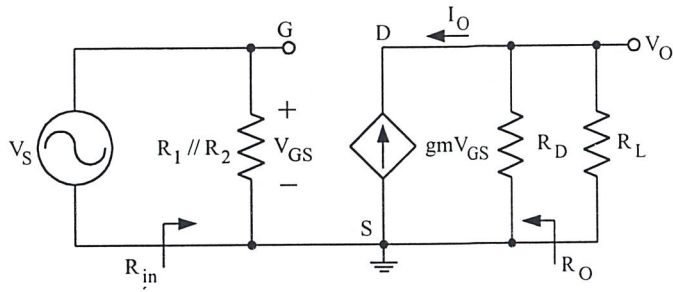
### 1.2) การวิเคราะห์วงจรในแบบแรงดันไฟสถับ

การวิเคราะห์วงจรในแบบ ไฟกระแสสถับ เมื่อวิเคราะห์ห้วงจรในทางไฟกระแสสถับแล้วสามารถนำค่า มาหาอัตราขยายความนำหรือ  $g_m$  ได้คือ

$$g_m = \frac{2I_{DD}}{|V_P|} \left[ 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right] \quad (2.32)$$

จากนั้นทำการลัดวงจรตัวเก็บประจุทั้งหมด และลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดันคงที่  $V_{DD}$  จะได้วงจรสมมูลย์ ดังรูปที่ 2.7

จากวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 2.7 จะได้สมการดังนี้



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลย้งจรซอสร่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์เต็มส่วน

ความต้านทานอินพุต  $R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_1 // R_2$  (2.33)

อัตราขยายแรงดัน  $A_V = \frac{V_o}{V_i} = g_m(R_D // R_L)$  (2.34)

ความต้านทานเอาต์พุต  $R_O = R_D$  (2.35)

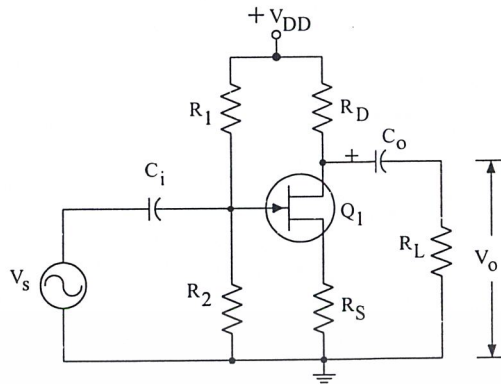
2) วงจรขยายแบบซอสร่วมที่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์

สำหรับการที่เราจะวิเคราะห์ห้วงจรเหมือนในวงจรในรูป 2.5 (ก) เพียงแต่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์จะมีความซับซ้อนกว่ารูปที่ 2.5 (ก) นอกจากนี้วงจรแบบนี้ยังมีอัตราขยายลดลงด้วย ซึ่งพิจารณาได้จากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของวงจร

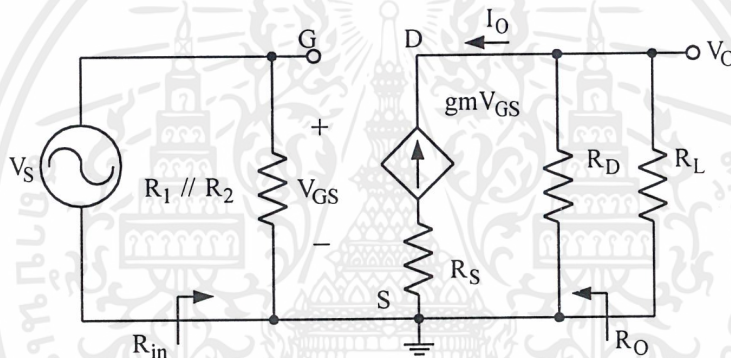
การวิเคราะห์ห้วงจรในแบบไฟกระแสล้นสามารถเขียนวงจรสมมูลย้งได้ดังนี้ จากวงจรสมมูลย้งรูปที่ 2.9 ได้สมการดังนี้

ความต้านทานอินพุต

$$R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R_1 // R_2 = R_G \quad (2.36)$$



รูปที่ 2.8 วงจรขยายขอสรร่วมที่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลขย้งจรขอสรร่วมที่ไม่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์

อัตราขยายแรงดัน

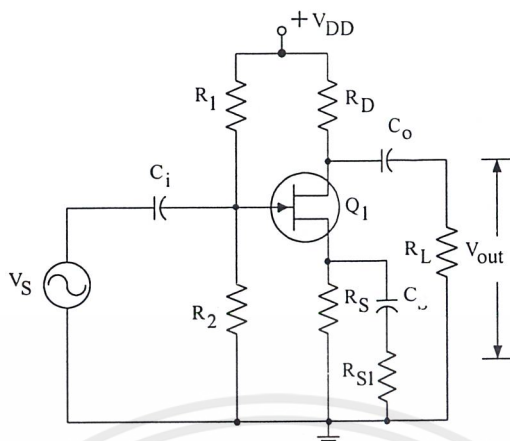
$$A_V = \frac{g_m(R_D // R_L)}{1 + g_m R_s} \quad (2.37)$$

ความต้านทานเอาต์พุต

$$R_O = R_D \quad (2.38)$$

### 3) วงจรขยายแบบขอสรร่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์บางส่วนแบบที่ 1

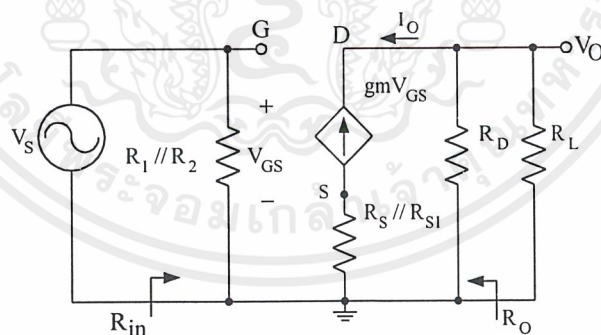
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจรขยายซอร์่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์บางส่วนแบบที่ 1

ลักษณะวงจรจะมีผลทางด้านไฟกระแสกลับ ซึ่งจะทำให้ค่าความต้านทาน  $R_S$  มีค่าน้อยลง และทำให้อัตราขยายแรงดันมากกว่าวงจรในรูปที่ 2.10 ส่วนทางด้านไฟกระแสตรงนั้น ไม่มีผลอะไรเพราะ  $R_{S1}$  จะไม่มีผลอะไร จะมีลักษณะเหมือนวงจรดังรูปที่ 2.10

ลักษณะวงจรสมมูลจะมีลักษณะเหมือนกันกับรูปที่ 2.7 และค่าความต้านทาน  $R_S$  นั้นจะค่าเท่ากับ  $R_S // R_{S1}$  ดังนั้นเป็นวงจรสมมูลยี่ได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 วงจรขยายแบบซอร์่วมที่มีตัวเก็บประจุบายพาสส์บางส่วนแบบที่ 1

### ความต้านทานอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{in} = R_1 // R_2 \quad (2.39)$$

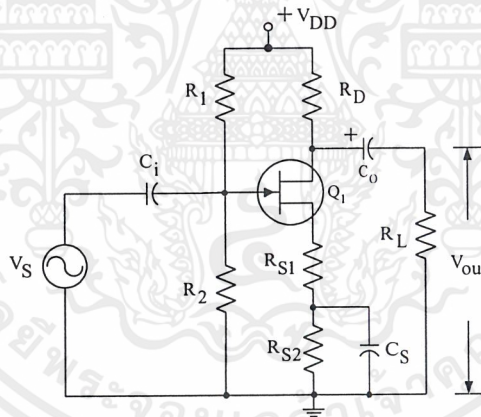
อัตราขยายแรงดัน

$$A_V = \frac{g_m(R_D // R_L)}{(1 + g_m(R_S // R_{S1}))} \quad (2.40)$$

ความต้านทานเอาต์พุต

$$R_o = R_D \quad (2.41)$$

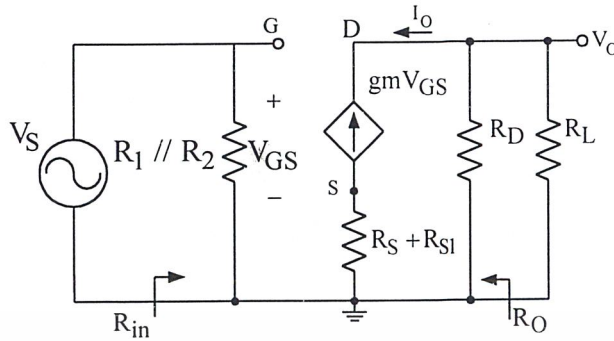
#### 4) วงจรขยายแบบซอร์รวมแบบบายพาสส์บางส่วนแบบที่ 2



รูปที่ 2.12 วงจรขยายซอร์รวมแบบบายพาสส์บางส่วนแบบที่ 2

วงจรบายพาสส์แบบบางส่วน คือ การบายพาสส์สัญญาณของวงจรซอร์รวมเพียงบางส่วนเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อไม่ให้อัตราขยายลดลงมากนัก และในทางกลับกัน ก็ต้องรักษาเสถียรภาพการไบแอสด้วยไฟกระแสตรงให้ดีขึ้น จึงต้องมีคาปาซิเตอร์ต่อบายพาสส์

วงจรบายพาสส์แบบบางส่วนสามารถวางจรสมมูลได้เหมือนกันกับวงจรซอร์รวมที่มีคาปาซิเตอร์บายพาสส์เพียงแต่ความต้านทาน  $R_S$  นั้นจะมีค่าน้อยลงเพราะบายพาสส์ไปแล้วตัวหนึ่ง ดังนั้นอัตราขยายแรงดันจึงมีค่ามากกว่ารูปที่ 2.13 สามารถเป็นวงจรสมมูลได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 วงจรขยายแบบซอร์สร่วมแบบบายพาสต์บางส่วนความต้านทานอินพุต

$$R_{in} = R_1 // R_2 \tag{2.42}$$

อัตราขยายแรงดัน

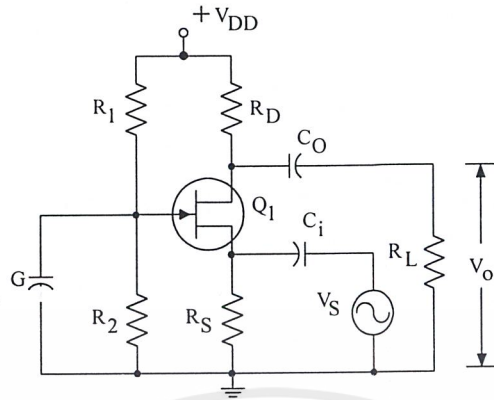
$$A_V = \frac{-g_m (R_D // R_L)}{(1 + g_m R_s)} \tag{2.43}$$

ความต้านทานเอาต์พุต

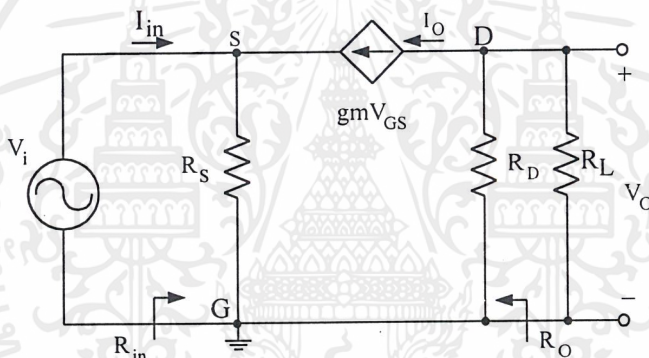
$$R_o = R_D \tag{2.44}$$

### 2.4.2 วงจรขยายเกทร่วม

วงจรขยายเกทร่วม อินพุตจะเข้าที่ขาซอร์ส และเอาต์พุตเข้าที่ขาเดรน มีคาทเป็นจุดร่วมของสัญญาณรูปลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.14 วงจรขยายเกทร่วมจะมีอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าแบบอื่น ส่วนเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าประมาณเท่ากับของตัวขยายซอร์สร่วม นอกจากนั้น สัญญาณเอาต์พุตจะไม่กลับเฟสกับอินพุต ส่วนอัตราขยายแรงดันก็มีค่าสูงมากเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.14 วงจรขยายสัญญาณแบบเกทร่วม



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลยวงจรขยายสัญญาณแบบเกทร่วม

สำหรับการวิเคราะห์ดังรูปที่ 2.14 และรูปที่ 2.15 นั้นจะไม่แสดงการวิเคราะห์แบบวิธีไฟกระแสดตรง เพราะมีรายละเอียดการวิเคราะห์เหมือนกับวงจรขยายแบบซอร์ร่วมที่ผ่านมาในใบงานก่อนแล้ว ดังนั้นจะแสดงการวิเคราะห์ทางด้านไฟกระแสดลับ ซึ่งวิเคราะห์ได้จากวงจรดังรูปที่ 2.15 ได้ดังนี้

ความต้านทานอินพุต

$$R_{in} = R_S // \frac{1}{g_m} \tag{2.45}$$

อัตราขยายแรงดัน

$$A_V = g_m (R_D // R_L) \tag{2.46}$$

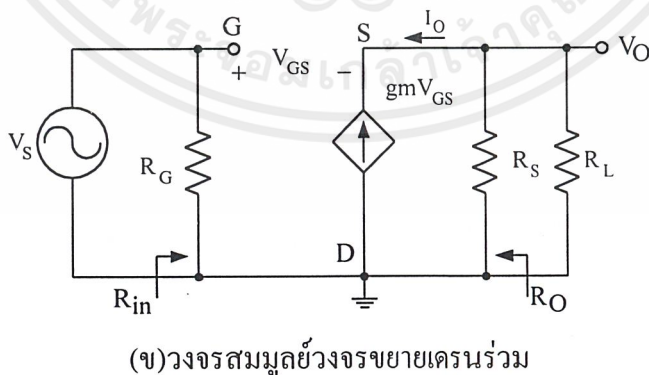
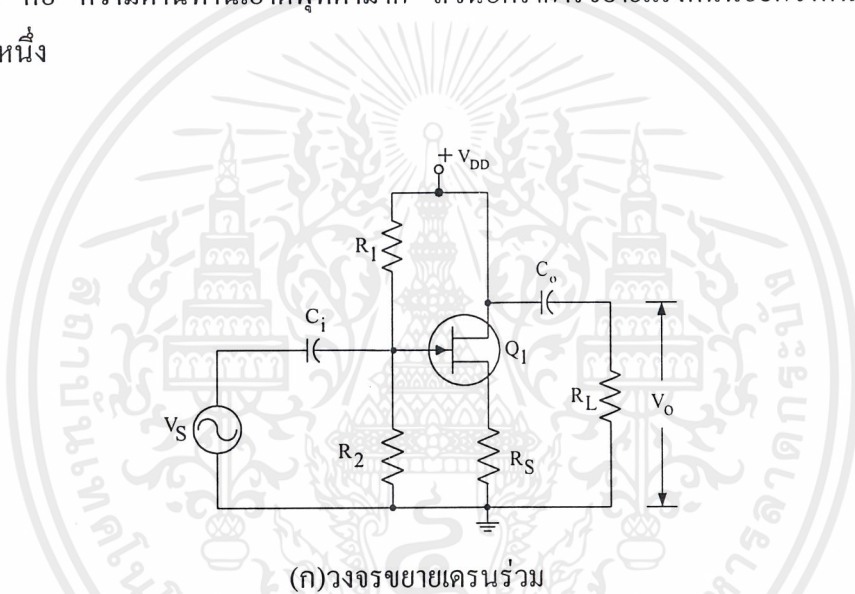
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานเอาต์พุต

$$R_L = R_D \quad (2.47)$$

### 2.4.3 วงจรขยายเดรนร่วม

ลักษณะของวงจรเดรนร่วม คล้ายกับรูปลักษณะของวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม คือ ไม่มี  $R_D$  ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก) อินพุตเข้าทางขาเกต ส่วนเอาต์พุตออกทางขาซอสและวงจรนี้มีคุณลักษณะเด่น คือ ความต้านทานเอาต์พุตต่ำมาก ส่วนอัตราขยายแรงดันน้อยกว่าหนึ่งหรืออาจจะประมาณหนึ่ง



รูปที่ 2.16 วงจรขยายเดรนร่วมและวงจรสมมูลขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์วงจรเพื่อหาคุณลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็กที่ความถี่กลาง เพื่อหาความต้านทานอินพุต อัตราการขยายแรงดัน และความต้านทานเอาต์พุตของวงจรซึ่งสามารถใช้ขั้นตอนการพิจารณาเช่นเดียวกับตัวขยายแบบอื่น ดังนั้นจากวงจรในรูป (ก) สามารถเขียนแทนด้วยวงจรสมมูลย์ได้ดังรูป 2.16 (ข) และสามารถวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติต่างๆ ได้ดังนี้

ความต้านทานอินพุต

$$R_{in} = R_G = (R_s // R_L) \quad (2.48)$$

อัตราขยายแรงดัน

$$A_V = \frac{g_m (R_s // R_L)}{1 + g_m (R_s // R_L)} \quad (2.49)$$

ความต้านทานเอาต์พุต

$$R_O = R_s // \frac{1}{g_m} \quad (2.50)$$

หรือ

$$R_O = R_s$$

## 2.5 ตัวขยายผลต่าง

หลักการของตัวขยายผลต่างมาสร้างให้เป็นจริงด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นั่นคือทรานซิสเตอร์ เช่น ตัวขยายผลต่างที่สร้างจากทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์ และทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเพื่อให้ทราบคุณสมบัติของตัวขยายผลต่าง โดยสรุปจึงกล่าวถึงคุณสมบัติตัวขยายผลต่างดังนี้คุณสมบัติตัวขยายผลต่าง ตัวขยายผลต่างสามารถแทนด้วยวงจรอย่างง่ายทำงานของวงจรในรูปนี้ก็คือ เมื่อแรงดันอินพุตทั้งสองของตัวขยายเท่ากัน เอาต์พุตของตัวขยายแรงดันจะเท่ากับศูนย์ และโดยทั่วไปอัตราการขยายผลต่างของวงจรจะมีค่าสูงมาก เช่นเดียวกันเมื่ออินพุตทั้งสองมีแรงดันต่างกันก็จะทำให้แรงดันเอาต์พุตมีค่าสูงมาก ดังนั้นแรงดันอินพุตจะมีสองแบบวิธีคือแรงดันอินพุตแบบวิธีผลต่าง และแบบวิธีผลรวม ซึ่งจากวงจรสามารถแทนแรงดันอินพุตทั้งสองได้ดังนี้

แรงดันแบบวิธีผลต่าง (Differential Mode) กำหนดเป็น  $V_{id}$  หาได้ดังนี้

$$V_{id} = V_a - V_b \quad (2.51)$$

แรงดันในแบบวิธีผลร่วม (Common Mode) คือ

$$V_{ic} = \frac{v_a + v_b}{2} \quad (2.52)$$

จากสมการที่ (2.50) และ (2.51) สามารถหาแรงดันที่จุด a และ b ได้ดังนี้

$$V_a = V_{ic} + \frac{V_{id}}{2} \quad (2.53)$$

$$V_b = V_{ic} - \frac{V_{id}}{2} \quad (2.54)$$

ดังนั้นสามารถแทนแหล่งจ่ายสัญญาณทั้งสองแบบเมื่อมีแรงดันด้านอินพุตสองแบบวิธี ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตที่เกิดขึ้นทั้งสองแบบวิธีนี้หาได้โดยวิธีการแทนที่โดยเอาต์พุตที่ได้จากการกระตุ้นของสัญญาณแบบวิธีผลต่างคือ  $V_{od}$  และเอาต์พุตที่ได้จากการกระตุ้นด้วยอินพุตแบบวิธีผลร่วมคือ  $V_{oc}$  ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

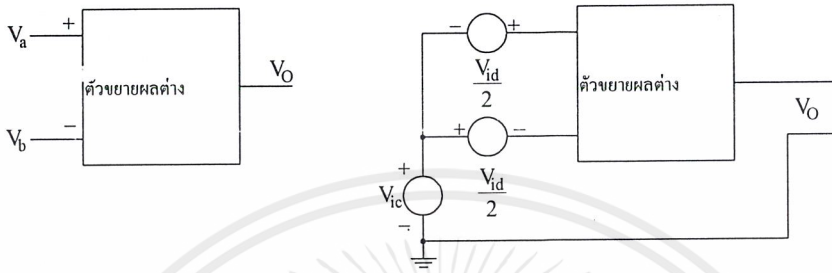
$$V_{od} = V_{id} A_d \quad (2.55)$$

$$V_{oc} = V_{ic} A_c \quad (2.56)$$

โดยที่  $A_d$  คืออัตราขยายผลต่าง และ  $A_c$  คืออัตราขยายผลร่วม ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตทั้งหมดจะได้

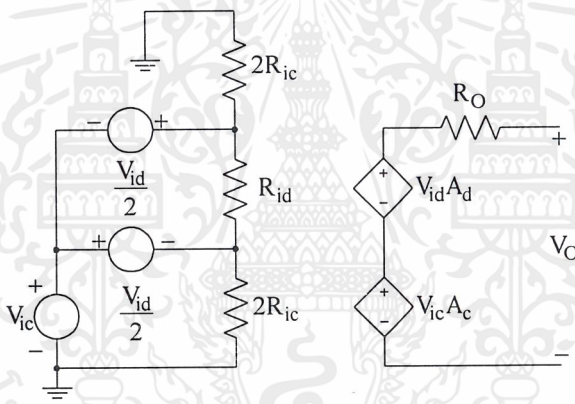
$$V_o = V_{id} A_d + V_{ic} A_c \quad (2.57)$$

ผลของความต้านทานภาระงานและจากสมการที่ (2.54), (2.55), และ(2.56) สามารถเขียน วงจรสมมูลสัญญาณขนาดเล็กลง (ใช้สัญญาณสี่เหลี่ยมแทนส่วนสัญลักษณ์สามเหลี่ยมจะใช้แทน ออปแอมป์เท่านั้น)



(ก) ตัวขยายผลต่างเบื้องต้น

(ข) สัญญาณอินพุตทั้ง 2 แบบวิธี



(ค) วงจรสมมูลย่อย

รูปที่ 2.17 ตัวขยายผลต่าง

เนื่องจากตัวขยายผลต่างมีทั้งอัตราขยายผลต่างซึ่งมีค่าสูงมากและอัตราขยายผลรวม ซึ่งมีค่าต่ำมาก ดังนั้นสามารถบอกคุณภาพหรือความสามารถของตัวขยายผลต่างได้จากอัตราส่วนของอัตราขยายทั้งสอง ซึ่งนิยามว่า อัตราการขจัดแบบวิธีร่วม CMRR ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$CMRR = \left| \frac{Ad}{Ac} \right| \tag{2.58}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือในหน่วยของเดซิเบลคือ

$$CMRR = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{dB} \quad (2.59)$$

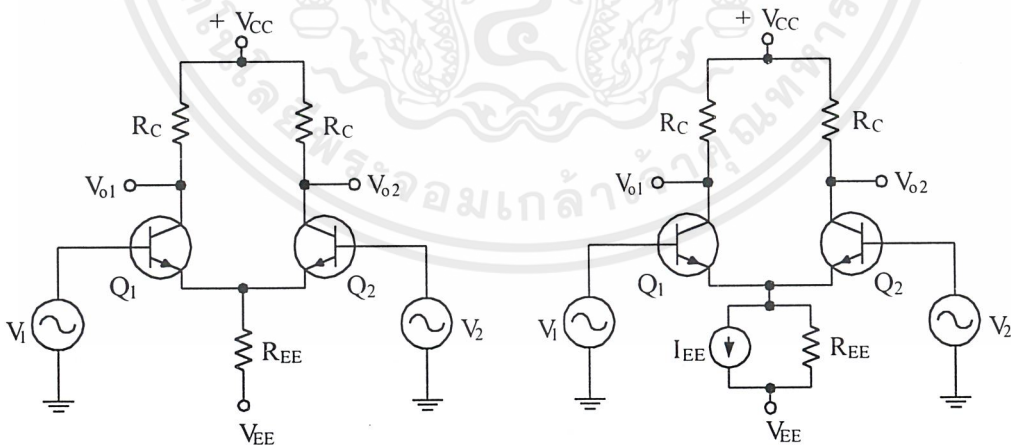
โดยที่อาจจะหาแรงดันเอาต์พุตได้จากความสัมพันธ์ที่เป็นหน้าที่ของ CMRR ดังนี้

$$V_o = A_d \left( V_{id} + \frac{1}{CMRR} V_{ic} \right) \quad (2.60)$$

สัญญาณในแบบวิธีผลรวมถูกหารด้วย CMRR ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับพจน์ของ  $A_d V_{id}$  เป็นส่วนใหญ่

### 2.5.1 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์

วงจรพื้นฐานของวงจรขยายผลต่างเป็นดังรูปที่ 2.18 (ก) ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของวงจรขยายผลต่างคือ จะขยายสัญญาณอินพุตที่มีเฟสตรงกันข้ามแต่จะบั่นทอนสัญญาณที่มีเฟสเหมือนกัน และเอาต์พุตที่ได้จะมีเฟสตรงข้าม เราสามารถแบ่งการทำงานของวงจรขยายผลต่างได้ 2 แบบ คือ



(ก) แบบวิธีที่ 1

(ข) แบบวิธีที่ 2

รูปที่ 2.18 วงจรขยายผลต่างแบบวิธีผลรวม

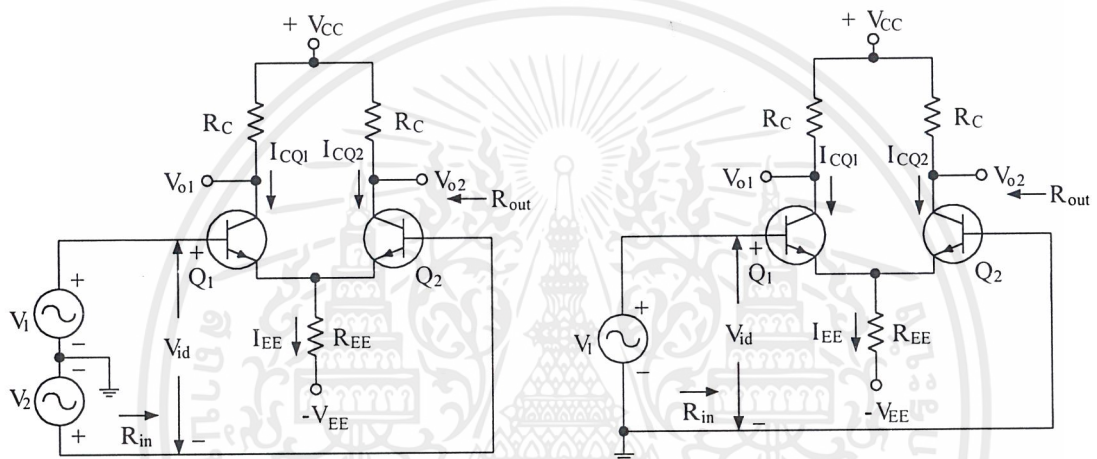
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) วงจรขยายผลต่างแบบวิธีผลต่าง

คือ สัญญาณอินพุตทั้งสองที่มีเฟสตรงกันข้ามกัน คือ วงจรมีอัตราขยายแรงดันสูง การป้อนอินพุตเข้าสู่วงจรจะสามารถทำได้ 2 แบบคือ

1.1) แบบสมดุลย์ (Balabce input) โดยการต่ออินพุตทั้งสองเข้าวงจรดังรูปที่ 2.19 (ก)

1.2) แบบไม่สมดุลย์ (Unbalance input) โดยการป้อนอินพุตเข้าที่อินพุตหนึ่ง ส่วนอินพุตหนึ่งจะต่อลงกราวด์ดังรูปที่ 2.19 (ข)



(ก) วงจรดิฟเฟอเรนเชียลแบบสมดุลย์

(ข) วงจรดิฟเฟอเรนเชียลแบบไม่สมดุลย์

รูปที่ 2.19 วงจรขยายแบบวิธีผลต่าง

สมมุติให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตจะเป็นดังนี้

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = \frac{I_{EE}}{2} \tag{2.61}$$

ในกรณีแบบอินพุตสมดุลย์

$$\begin{aligned} V_1 &= -V_2 \\ V_{id} &= V_1 - V_2 \end{aligned} \tag{2.62}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$V_{id} = 2V_1 = -2V_2 \quad (2.63)$$

ในกรณีแบบอินพุตไม่สมมูลย์

$$V_{id} = V_1; V_2 = 0 \quad (2.64)$$

$A_d$ : อัตราการขยายแรงดันในขณะอินพุตต่างเฟส ไม่ว่าจะป็นกรณีของการป้อนอินพุตแบบสมมูลย์และแบบไม่สมมูลย์

$$V_{O2} = -V_{O1} = \frac{V_{id}}{2} \left( \frac{-\beta \cdot R_C}{r_b + r_{\pi}} \right) \quad (2.65)$$

จะได้

$$|A_d| = \left| \frac{V_O}{V_{id}} \right| = \frac{1}{2} \left( \frac{-\beta \cdot R_C}{r_b + r_{\pi}} \right) \quad (2.66)$$

ความต้านทานอินพุตจะมีค่าเท่ากับ

$$R_{in} = (r_b + r_{\pi}) + (\beta + 1) \left[ R_E \parallel \left( \frac{r_b + r_{\pi}}{\beta + 1} \right) \right] \quad (2.67)$$

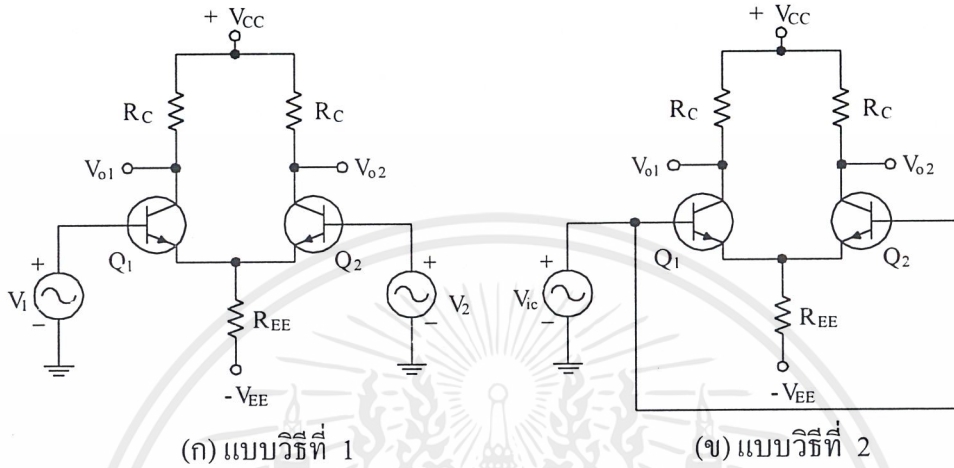
ความต้านทานเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับ

$$R_{out} = R_C \quad (2.68)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) วงจรขยายผลต่างแบบวิธีผลรวม

คือ สัญญาณอินพุตทั้งสองมีเฟสเหมือนกัน ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 วงจรขยายแบบวิธีผลรวม

โดยที่

$$V_{ic} = \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{2.69}$$

ถ้าอินพุต

$$V_1 = V_2 \tag{2.70}$$

$$V_{ic} = V_1 = V_2 \tag{2.71}$$

$A_c$  : อัตราการขยายแรงดันในขณะอินพุตมีเฟสเหมือนกัน

$$|A_c| = \left| \frac{V_O}{V_{ic}} \right| = \left( \frac{-\beta \cdot R_C}{r_b + r_{\pi} + 2(\beta + 1)R_E} \right) \tag{2.72}$$

อัตราส่วนของ Differential Mode Gain ต่อ Common Mode Gain เรียกว่าค่า Common Mode Rejection Ratio (CMRR) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

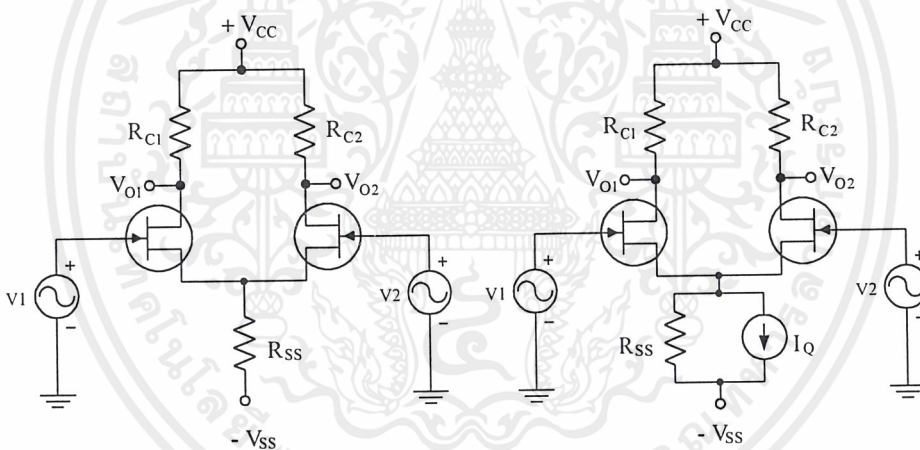
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{r_b + r_{\pi} + 2(\beta + 1)R_E}{2(r_b + r_{\pi})} \quad (2.73)$$

## 2.5.2 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

เจฟตเป็นอุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน และเป็นอุปกรณ์ที่มีความต้านทานอินพุตสูงประมาณ  $10^9$  ถึง  $10^{12}$  ดังนั้นกระแสไบแอสอินพุตจึงต่ำมากๆ ประกอบกับที่ขบวนการสร้างไม่ซับซ้อน ทำให้ได้รับความนิยมในการนำไปสร้างเป็นวงจรรวม แต่ข้อด้อยของตัวขยายผลต่างที่ใช้เจฟตคือ มีค่าทรานสคอนดักแตนซ์ต่ำ ดังนั้นทำให้อัตราการขยายแรงดันต่ำกว่าใช้ทรานซิสเตอร์

วงจขยายผลต่างที่ใช้เจฟตมีวงจรพื้นฐานดังรูปที่ 1 ซึ่งการไบแอสอาจจะใช้ตัวต้านทานหรือแหล่งจ่ายกระแสก็ได้โดยทั่วไปนิยมใช้แหล่งจ่ายกระแส



(ก) การไบแอสโดยใช้ตัวต้านทาน (ข) การไบแอสโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสคงที่

รูปที่ 2.21 วงจรพื้นฐานของวงจขยายผลต่างพื้นฐาน

คุณสมบัติที่สำคัญของวงจขยายผลต่างโดยใช้เจฟตและการทำงานของวงจสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ (Mode) เช่นเดียวกับวงจขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ คือ

### 1) วงจขยายผลต่างแบบวิธีผลต่าง

$A_d$  : อัตราการขยายแรงดันในขณะอินพุตต่างเฟส

$$\left| A_d \right| = \left| \frac{V_O}{V_{id}} \right| = gmR_D \quad (7.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานอินพุต จะมีค่าเท่ากับ

$$R_{id} = \infty \quad (2.75)$$

ความต้านทานเอาต์พุต จะมีค่าเท่ากับ

$$R_{out} = R_D \quad (2.76)$$

## 2) วงจรขยายผลต่างแบบวิธีผลรวม

$A_C$  : อัตราการขยายแรงดันในขณะอินพุตมีเฟสเหมือนกัน

$$|A_c| = \left| \frac{V_O}{V_{ic}} \right| = \left( \frac{-g_m R_D}{1 + 2g_m R_{ss}} \right) \quad (2.77)$$

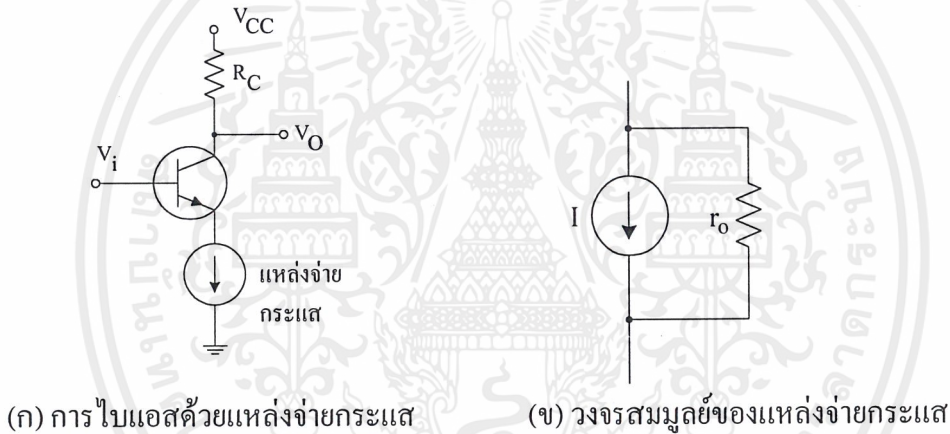
อัตราส่วนของ (CMRR) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_C} \right| = 1 + 2g_m R_{ss} \quad (2.78)$$

## 2.6 แหล่งจ่ายกระแสที่ใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์

เมื่อต้องการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นตัวขยายเชิงเส้นจะต้องไบแอสให้มันทำงานในแบบวิธีไวงาน การไบแอสให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในแบบวิธีดังกล่าวอาจจะใช้แหล่งจ่ายกระแสมาไบแอสเพื่อรักษากระแสคอลเลกเตอร์ให้คงที่ที่จุดสงบ แทนที่จะใช้วิธีการไบแอสโดยใช้โครงข่ายของรีซิสเตอร์ การไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.22 (ก) และในวงจรรวมทั้งจะใช้วิธีการไบแอสด้วยกระแสเช่นเดียวกันอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเราไม่สามารถสร้างแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติได้ เพราะแหล่งจ่ายกระแสที่สร้างขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดความต้านทานภายในเกิดขึ้นจนแหล่งจ่ายกระแสดังกล่าวจะสมมูลย์ในรูป 2.22 (ข) ดังนั้นในการปฏิบัติจะต้องสร้างให้  $r_o$  มีค่าสูงๆ เพื่อให้แหล่งจ่ายกระแสมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 2.22 (ก) แหล่งจ่ายกระแสจะรักษากระแสให้ไหลผ่านในสาขาที่ตัวมันเองปรากฏอยู่ให้มีค่าคงที่ให้เท่ากับค่ากระแสของมัน ดังนั้นจากวงจรนี้ถึงแม้ว่าแหล่งจ่ายแรงดันจะมีการเปลี่ยนแปลงไปแต่กระแสที่คอลเลกเตอร์จะยังคงที่เท่ากับกระแสไบแอส หรือแม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนไปกระแสสาคอลเลกเตอร์ก็มีค่าคงที่เท่ากับแหล่งจ่ายกระแสไบแอสด้วย อย่างไรก็ตามข้อดีดังกล่าวเหล่านี้จะเป็นจริงได้เมื่อแหล่งจ่ายกระแสมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคติ ในวงจรรวมแหล่งจ่ายกระแสจะเป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงทำหน้าที่เป็นตัวไบแอสวงจร และเป็นตัวภาระงานของวงจรทางเอาต์พุตด้วย และในวงจรแหล่งจ่ายกระแสในทางปฏิบัติมักจะใช้กระแสอ้างอิงไว้หนึ่งสาขา แล้วจึงสะท้อนกระแสอ้างอิงไปยังอีกสาขาหนึ่ง จึงมักจะเรียกแหล่งจ่ายกระแสแบบนี้ว่าตัวสะท้อนกระแส



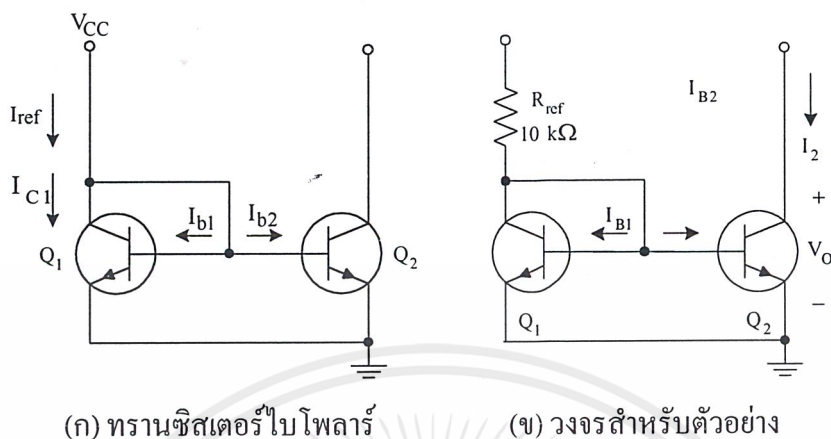
รูปที่ 2.22 วงจรอิมิตเตอร์ร่วมที่ไบแอสด้วยแหล่งจ่ายกระแส

### 2.6.1 ตัวสะท้อนกระแสพื้นฐาน

ตัวสะท้อนกระแสพื้นฐานที่สร้างด้วยทรานซิสเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.23 (ก) ในวงจรนี้ใช้ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์สองตัวและทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีแรงดันเบส-อิมิตเตอร์เท่ากัน ดังนั้นถ้าทำทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะเท่ากับ (ละทิ้งผลของปรากฏการณ์อันดับสอง) นั่นคือกระแส เอาต์พุต  $I_2$  จะประมาณเท่ากับกระแส กระแสอ้างอิง  $I_{ref}$  เราทำว่ากระแสของทรานซิสเตอร์เขียนในวงจรของเอทิโปเนนเชียลได้ดังนี้

$$I_C = e^{\frac{qV_{BE}}{V_T}} (1 + V_{CE}/V_A) \tag{2.79}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ตัวสะท้อนกระแสพื้นฐาน

โดยที่  $I_S$  คือกระแสอิ่มตัวของทรานซิสเตอร์ที่แปรผันตามพื้นที่ของอิมิตเตอร์ ดังนี้

$$I_S = \frac{qD_B n_i^2 A_E}{Q_B} \tag{2.80}$$

โดยที่  $D_S$  เป็นค่าคงตัวการแพร่กระจายของพาหะข้างน้อยในเบส (เป็นอิเล็กตรอนสำหรับ NPN และเป็นโฮลสำหรับ PNP)  $N_1$  คือ ความหนาแน่นพาของบริสุทธิ์ของสารคือ ตัวนำ  $A_E$  คือพื้นที่ของรอบต่อเบส-อิมิตเตอร์ และ  $A_E$  คือจำนวนประจุพาหะข้างมากต่อหน่วยพื้นที่ในเบส (เป็นโวลท์สำหรับ NPN และเป็นอิเล็กตรอนสำหรับ PNP) ในขบวนการของวงจรรวม ทรานซิสเตอร์ทั้งสอง (หรือตัวอื่นๆ) จะถูกสร้างพร้อมกันดังนั้นสามารถกำหนดค่า  $I_S$  ได้จากพื้นที่อิมิตเตอร์ (ถูกกำหนดโดยผู้ออกแบบ) ซึ่งทำให้ทรานซิสเตอร์มีพารามิเตอร์ที่เหมือนกันมาก เช่น ค่าอัตราขยายกระแส B และค่าแรงดันเออร์รี่  $V_A$  จาก (100) ทราบว่า

$$V_{BE} = \frac{V_{T1}}{q} \ln \frac{I_{C1}}{I_{S1}(1+V_{CE2}/V_{A1})} \tag{2.81}$$

$$V_{BE} = \frac{V_{T2}}{q} \ln \frac{I_{C2}}{I_{S1}(1+V_{CE2}/V_{A1})} \tag{2.82}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในวงจรสะท้อนกระแสทราบว่า  $Q_1$  และ  $Q_2$  มี  $V_{BE}$  เท่ากันดังนั้นจะได้

$$\frac{I_{C1}}{A_1(1+V_{CE1}/C_f)} = \frac{I_{C2}}{A_2(1+V_{CE2}N_A)} \quad (2.83)$$

โดยที่  $A_1$  และ  $A_2$  คือ พื้นที่อิมิตเตอร์ของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  ตามลำดับ และ พิจารณากระแสในวงจรรูปที่ 2.23 (ก) จะได้ว่า

$$I_{ref} = I_{c1} + I_{B1} + I_{B2} = I_{C1} + \frac{I_{C1}}{\beta} + \frac{I_{C2}}{\beta} \quad (2.84)$$

จากสมการสามารถประมาณได้ว่า

$$I_{C2} \cong \frac{A_2}{A_1} I_{C1} \quad (2.85)$$

จากสมการที่ (2.83) แทนใน (2.84) จะได้ว่า

$$I_{ref} = I_{C1} + \frac{I_{c1}}{\beta} + \frac{A_2}{A_1} \frac{I_{C1}}{\beta} = \left[ 1 + \frac{1}{\beta} \left( 1 + \frac{A_2}{A_1} \right) \right] I_{C1} \quad (2.86)$$

ดังนั้น

$$I_{C1} = \frac{I_{ref}}{1 + \frac{1}{\beta} \left( 1 + \frac{A_2}{A_1} \right)} \quad (2.87)$$

และถ้าแทนสมการที่ (2.86) ลงในสมการที่ (2.84) แล้วเราจะได้ความสัมพันธ์ของกระแส  $I_2$  หรือ  $I_{C2}$  กับ  $I_{ref}$  ดังนี้

$$I_2 = \frac{A_2}{A_1} I_{ref} \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta} \left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right)} \right) \left( \frac{1 + V_{CE2}/V_A}{1 + V_{CE1}/V_A} \right) \quad (2.88)$$

จากสมการนี้ถ้า  $B_F \gg 1$  และ  $V_A \gg V_{CE}$  แล้วสามารถประมาณกระแสเอาต์พุต  $I_2$  ได้ดังนี้

$$I_2 \approx \frac{A_2}{A_1} I_{ref} \quad (2.89)$$

ซึ่งกระแสเอาต์พุต  $I_2$  จะเท่ากับ  $I_{ref}$  เมื่อทรานซิสเตอร์ทั้งสองมีพื้นที่อิมิตเตอร์เท่ากับและถ้าต้องการให้กระแสที่สะท้อนด้านเอาต์พุตมีค่ามากหรือน้อยก็สามารถกำหนดได้จากอัตราส่วนของพื้นที่อิมิตเตอร์ของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  นั่นเอง สำหรับกราฟคุณลักษณะด้านเอาต์พุตแสดงได้ดังรูป



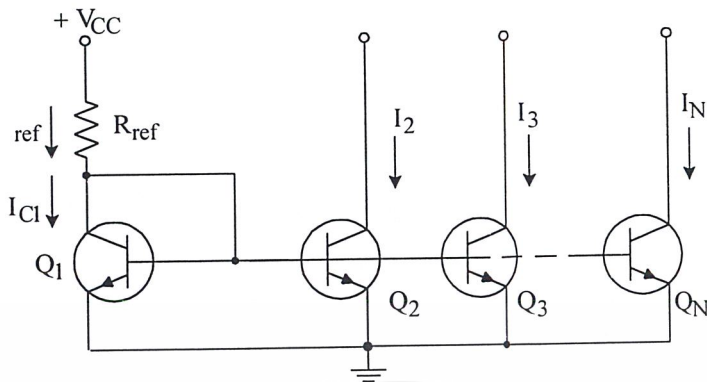
รูปที่ 2.24 คุณลักษณะกระแสด้านเอาต์พุตของตัวสะท้อนกระแสพื้นฐานที่ใช้ BJT

## 2.6.2 แหล่งกระจายกระแสพื้นฐานที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต

ในกรณีที่ต้องการใช้แหล่งจ่ายกระแสที่มากกว่า 1 เอาต์พุตจากกระแสอ้างอิงแหล่งเดียวกันแสดงได้ดังรูปที่ 2.24 ซึ่งเอาต์พุตของแต่ละตัวหาได้ดังนี้

$$I_j = \frac{A_i}{A_1} I_{ref} \quad \text{โดยที่ } j=2, 3, 4, \dots, N \quad (2.90)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

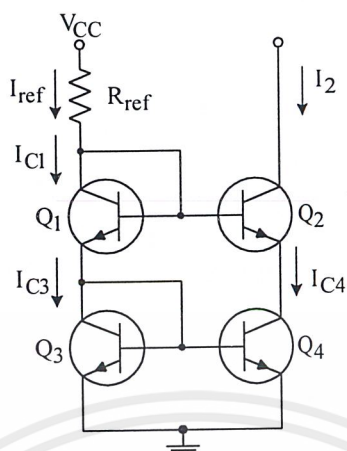


รูปที่ 2.25 แหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต

โดยทั่วไปเทคนิคนี้มักจะใช้ในวงจรรวมเชิงอุปมาน แต่อย่างไรก็ตามแหล่งจ่ายกระแสจากวงจรพื้นฐานนี้อาจจะทำให้กระแสเอาต์พุตต่างจากกระแสที่กำหนดได้ ถ้าหากอัตราขยายกระแส  $\beta$  มีค่าไม่สูงเพียงพอ โดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มจำนวนทรานซิสเตอร์เข้าไปหลาย ๆ ตัวอาจจะทำให้กระแสเบสแตกต่างกันทำให้เกิดเอาต์พุตที่ผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงได้มีการแสดงกระแสเบสของแหล่งจ่ายพื้นฐานเพื่อลดค่าผิดพลาดดังกล่าวซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

### 2.6.3 แหล่งจ่ายกระแสแบบคาสโคด

ในหัวข้อก่อนนี้เราได้พิจารณาผลการผิดพลาดที่เกิดจากผลของกระแสเบสในพจน์ที่สองของสมการเอาต์พุตและแก้ไขโดยการชดเชยโดยเพิ่มอัตราขยายเพิ่มให้กระแสเบสของพจน์ที่สองลดลงไม่เพียงเท่านั้น การผิดพลาดยังเกิดขึ้นได้อีกถ้าหากความต้านทานเอาต์พุตมีค่าไม่สูงพอ นั้นหมายถึงแหล่งจ่ายกระแสจะมีค่าต่างจากแหล่งจ่ายกระแสในอุดมคตินั้นเอง ผลวันนี้เกิดจากความต้านทานเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงตามกระแสและแรงดันเอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 2.26 ผลของการเปลี่ยนแปลงของกระแสและแรงดันนี้จะทำให้เกิดความต้านทานเอาต์พุต  $R_O$  ของวงจร สำหรับในวงจรแหล่งจ่ายกระแสพื้นฐานที่ใช้ อาจสะท้อนกระแสความต้านทานเอาต์พุตของมันจะมีค่าเท่ากับความต้านทานเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์  $r_o$  เพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจจะมีค่าไม่สูงเพียงพอ ดังนั้น จะได้ออกแบบวงจรใหม่เพื่อชดเชยผลอันนี้ ตัวอย่างหนึ่งที่ใช้ชดเชยผลอันนี้คือ วงจรแหล่งจ่ายกระแสโคด ดังแสดงแสดงในรูปที่ 2.25 ในวงจรนี้  $Q_3$  และ  $Q_4$  คือวงจรสะท้อนกระแสพื้นฐาน ส่วน  $Q_1$  และ  $Q_2$  เป็นตัวสะท้อนกระแสส่วนที่สองซึ่งต่อเพิ่มเข้ามาในลักษณะอนุกรมกับภาคแรก สังเกตว่า จะต่อคาสโคดกัน โดยใช้แรงดันไบแอสติคจาก  $V_{BE}$  ของ  $Q_1$  และ  $Q_2$  เพื่อให้  $Q_4$  ทำงานบริเวณในการไปหน้าได้



รูปที่ 2.26 วงจรแหล่งจ่ายกระแสคาลโคด

จากรูปที่ 2.26 พิจารณาที่คอลเลกเตอร์ของ  $Q_1$  เมื่อกำหนดให้  $I_{R1} = I_{B2} = I_B$  และ  $\beta$  ของทรานซิสเตอร์ทุกตัวเท่ากันแล้ว

$$I_{ref} = I_{C1} + 2I_B \quad (2.91)$$

ดังนั้น

$$I_{C1} = \frac{I_{ref}}{1 + 2/\beta} \quad (2.92)$$

เช่นเดียวกับ

$$I_{B3} = \frac{I_{ref}}{1 + 2/\beta} = I_{C4} \quad (2.93)$$

จากความสัมพันธ์

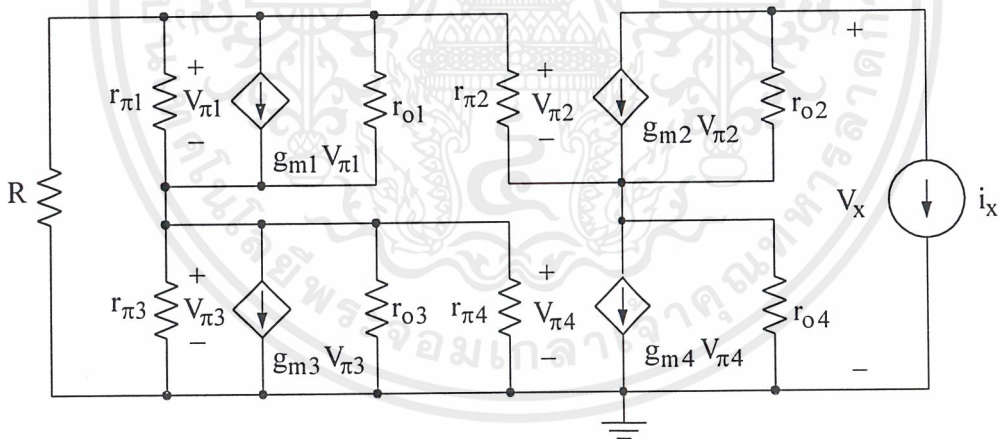
$$I_C = \left( \frac{\beta}{1 + \beta} \right) I_E \quad (2.94)$$

ดังนั้น จากสัมพันธ์ของสมการจะได้

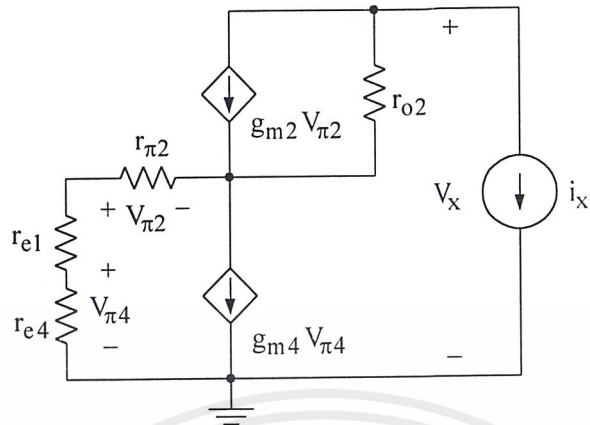
$$I_2 = I_{ref} = \frac{1}{1 + \frac{4}{\beta} \left( 1 + \frac{1}{\beta_F} \right)} \approx I_{ref} \frac{1}{(1 + 4/\beta)} \quad (2.95)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการจะเห็นว่าในวงจรนี้มีความไวของการเปลี่ยนแปลงค่า  $B$  มากกว่าวงจรพื้นฐาน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความต้านทานเอาต์พุตของมันแล้วจะสูงกว่าวงจรของหลังจ่ายกระแสพื้นฐาน ดังจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป การพิจารณาความต้านทานเอาต์พุต  $R_O$  ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสโคคด้วยวงจร สมมูลย์สัญญาณขนาดเล็ก แล้วใช้วิธีการหาค่าความต้านทานเอาต์พุต โดยลัดวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน  $V_{CC}$  แล้วใส่ในกระแสทดสอบ  $2x$  ที่เอาต์พุต แล้วหาความสัมพันธ์ของกระแส  $V_x$  ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยกระแสทดสอบกับกับกระแสทดลอง  $i_x$  แต่เนื่องจากในวงจรนี้จะเห็นว่ากระแสที่ไหลผ่าน  $r_{O4}$  น้อยกว่า  $g_{m4} V_{\pi1}$  มากๆ เพราะมันได้ต่อกับเอาต์พุต โดยตรงดังนั้นสามารถละทิ้ง  $r_{O4}$  ได้ และจะเห็นว่าแหล่งจ่ายกระแสไม่อิสระ  $g_{m4} V_{\pi1}$  เมื่อ  $V_{\pi1}$  คือแรงดันที่ปลายทั้งสองของ  $g_{m3} V_{\pi3}$  สามารถแทนด้วยความต้านทาน  $g_{m3}$  แต่จะเห็นว่าความต้านทาน  $g_{m3}$  ขนานกับ  $g_{m1}$  และ  $r_{\pi3}$  โดยทั่วไป  $r_{O1} \gg (1/g_{m1}) // r_{\pi1}$  --- ดังนั้นละทิ้ง  $r_{O1}$  ได้ เหตุผลเดียวกันสามารถละทิ้งข้อ 3 ได้เช่นเดียวกัน ถ้าดังนั้นสามารถเขียนวงจรให้ง่ายขึ้นได้ดังรูปที่ 2.27



(ก) วงจรสมมูลย์สัญญาณขนาดเล็ก



(ข) การประมาณค่าต่าง ๆ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ

รูปที่ 2.27 วงจรแหล่งจ่ายกระแสแบบคาสโคด

จากวงจรในรูปที่ 2.27 สามารถหาค่าความต้านทานทางเอาต์พุตได้ดังนี้

$$R_O = \frac{v_x}{i_x} = r_{o2} + \frac{\beta r_{o2}}{g_{m4} r_{e3} + 1} + \frac{r_T}{g_{m4} r_{e3} + 1}$$

$$R_O = r_{o2} \left( 1 + \frac{\beta}{g_{m4} r_{e3} + 1} \right) + \frac{r_T}{g_{m4} r_{e3} + 1} \quad (2.96)$$

และเนื่องจากเมื่อแทนค่าของ  $r_{C3}$  แล้วปรากฏว่า พจน์ของ  $(g_{m4} r_{C3} + 1) = 2$  ดังนั้นจากสมการสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$R_O = r_{o2} \left( 1 + \frac{\beta}{2} \right) + \frac{r_T}{2} \quad (2.97)$$

เนื่องจากพจน์ของ  $r_{o2} \left( 1 + \frac{\beta}{2} \right) \gg r_T / 2$  ดังนั้น

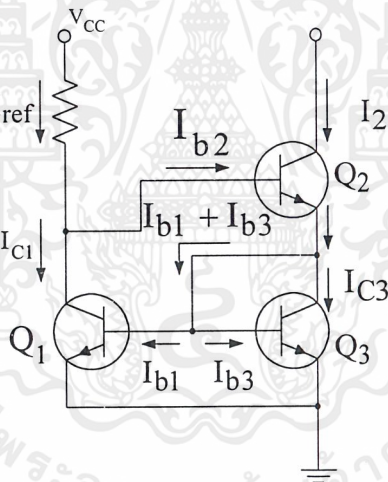
$$R_O = r_{o2} \left( 1 + \frac{\beta}{2} \right) \approx \frac{\beta}{2} r_{o2} \quad (2.98)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.95) จะเห็นว่าความต้านทานเอาต์พุตเพิ่มมากขึ้น  $\beta/2$  เท่าเมื่อเทียบกับความต้านทานเอาต์พุตของแหล่งจ่ายกระแสพื้นฐาน (มี  $R_O \approx r_O$  )

#### 2.6.4 วงจรแหล่งจ่ายกระแสแวลิตัน

แหล่งจ่ายกระแสแบบวิลสันเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่ปรับปรุงเพื่อต้องการให้กระแสเอาต์พุตใกล้เคียงกับกระแสอ้างอิงมากที่สุด และขณะเดียวกันความต้านทานเอาต์พุตก็ต้องสูงด้วย และเพื่อให้เกียรติแก่ผู้คิดค้นคือ G.R wilson จึงเรียกแหล่งจ่ายกระแสแบบนี้ว่าแหล่งจ่ายกระแสแวลิตัน ลักษณะวงจรจากวงจร  $Q_3$  เหมือนกับเป็นไดโอด ทั้งยังทำหน้าที่เป็นโครงข่ายป้องกันด้วย ซึ่งจะส่งผลให้กระแสเอาต์พุตมีเสถียรภาพมากขึ้น เนื่องจากเมื่อ  $I_2$  เพิ่มขึ้นก็ทำให้  $I_{C3}$  เพิ่มขึ้น ส่งผลให้  $V_{BE3}$  เพิ่มขึ้น และ  $I_{C1}$  เพิ่มขึ้น ดังนั้น  $I_{B2} = I_{ref} - I_{C1}$  จึงลดลงทำให้  $I_{C2}$  ลง ทำให้กระแสเอาต์พุตคงที่



รูปที่ 2.28 แหล่งจ่ายกระแสแวลิตัน

จากวงจรสามารถหาค่ากระแสแรงดันเอาต์พุต เมื่อกำหนดให้  $I_{B1} = I_{B3}$  และ  $I_{C1} = I_{C2}$  และให้  $B_1 = B_2 = B_3$  แล้วเราจะได้

$$I_{ref} = I_{C1} + I_{B2} \quad (2.99)$$

$$I_{E2} = I_{C3} + 2I_{B3} = I_{C3} \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \quad (2.100)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{C3} = \frac{I_{E2}}{\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)} \left(\frac{1 + \beta}{\beta}\right) I_{C2} = \frac{(1 + \beta)}{(2 + \beta)} I_{C2} \quad (2.101)$$

จากสมการที่ (2.100) แทน  $I_{C1}$  ได้ด้วย  $I_{C3}$  จะได้

$$I_{ref} = I_{C3} + I_{B2} \quad (2.102)$$

แล้วแทนสมการ (2.94) ลงใน  $I_{ref}$  ของ (2.95) ได้

$$I_{ref} = \frac{(1 + \beta)}{(2 + \beta)} I_{C2} + \frac{I_{C2}}{\beta} \quad (2.103)$$

จากเรทราบว่  $I_{C2} = I_2$  หรือกระแสเอาต์พุต ดังนั้น

$$\begin{aligned} I_{ref} &= I_2 \left[ \frac{1}{\beta} + \frac{(1 + \beta)}{(2 + \beta)} \right] \\ I_{ref} &= I_2 \left[ \frac{(2 + \beta) + \beta(1 + \beta)}{(2 + \beta)\beta} \right] = I_2 \frac{(2 + \beta + \beta + \beta^2)}{2\beta + \beta^2} \\ I_{ref} &= I_2 \left[ \frac{2 + 2\beta + \beta^2}{2\beta + \beta^2} \right] = I_2 \left[ \frac{2}{2\beta + \beta^2} + \frac{2\beta + \beta^2}{2\beta + \beta^2} \right] \\ I_{ref} &= I_2 \left[ \frac{2}{2\beta + \beta^2} + 1 \right] \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะได้กระแสเอาต์พุตดังนี้

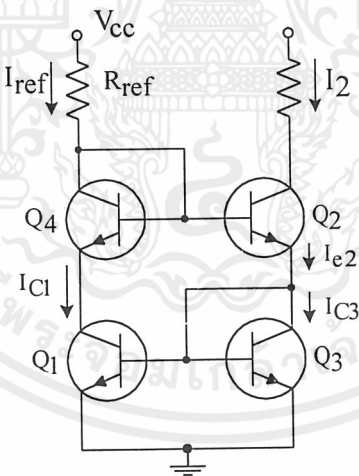
$$I_2 = I_{ref} \left[ \frac{1}{1 + \frac{2}{2\beta + \beta^2}} \right] \quad (2.104)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.101) จะเห็นว่าถ้า  $\beta$  มีค่ามากแล้ว  $I_2 \approx I_{ref}$  และสำหรับแหล่งจ่ายกระแสแบบวิลสันนี้  $\beta$  เป็นพจน์กำลังสองดังนั้นเป็นไปได้ที่  $I_2$  จะเท่ากับ  $I_{ref}$  ได้มากกว่าแหล่งจ่ายกระแสพื้นฐาน สำหรับความต้านทานเอาต์พุตก็มีวิธีหาเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา ผลการวิเคราะห์วงจรสมมูลย์สัญญาณขนาดห้วงวงจรมีจะได้ความต้านทานเอาต์พุตดังนี้

$$R_O = \frac{\beta}{2} r_{O2} \quad (2.105)$$

ซึ่งความต้านทานเอาต์พุตของแหล่งจ่ายกระแสแบบวิลสันจะมีค่าประมาณเท่ากับของวงจรถอดโคดเนื่องจากแหล่งจ่ายวิลสันจะเห็นว่า  $V_{CE1} = 2V_{BE}$  โดยที่  $V_{CE3} = V_{BE}$  ซึ่งมีความแตกต่างของ  $V_{CE}$  ดังกล่าวนี้อาจส่งผลให้กระแสคอลเลกเตอร์ไม่สมดุลกันเนื่องจากข้อจำกัดของความต้านทานเอาต์พุตที่ตัวทรานซิสเตอร์ ดังนั้นการชดเชยให้แรงดันคอลเลกเตอร์ทั้งสองเท่ากันได้ โดยการเพิ่มทรานซิสเตอร์ที่ต่อให้มีคุณสมบัติเป็นไดโอดเข้าไปทางด้านของกระแสอ้างอิงดังรูป



รูปที่ 2.29 แหล่งจ่ายกระแสวิลสันที่มีการปรับปรุงแล้ว

จากวงจรในรูปที่ 2.29 เท่ากับ  $I_{C1}$  เท่ากับ  $I_{C3}$  และละทิ้งความต้านทานเอาต์พุตของ  $Q_1$  แล้ว  $I_2$  เท่ากับ  $I_{ref}$  เช่นเดียวกัน

### 2.6.5 แหล่งจ่ายกระแสวิลสัน

แหล่งจ่ายกระแสแสดงได้ดังรูปที่ 3.30 จะเห็นว่า มีรูปลักษณะคล้ายกับแหล่งจ่ายกระแสตามอัตราส่วนของความต้านทานในหัวข้อที่ผ่านมาเพียงแต่กำหนดให้  $R_1$  ต่ำมาก ๆ หรือเท่ากับศูนย์ ใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์กับวงจรที่ต้องการกระแสต่ำมากๆ โดยไม่ต้องใช้กระแสอ้างอิงต่ำ ๆ เพราะจะทำให้ความต้านทานอ้างอิงมีค่ามาก สำหรับวงจรนี้สามารถใช้ผลการวิเคราะห์จากวงจรก่อนหน้าที่ได้โดยแล้ว กำหนดให้  $R_1 = 0$  จะได้กระแสเอาต์พุตของแหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์ดังนี้

$$I_2 = \frac{KT}{qR_2} \ln \left( \frac{A_2 I_{ref}}{A_1 I_2} \right) \quad (2.106)$$

โดยที่

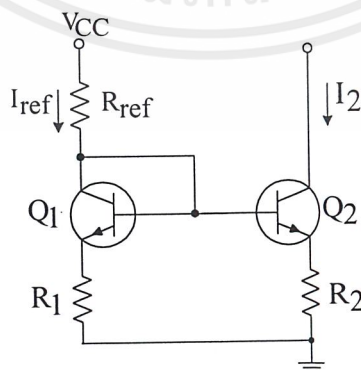
$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R_{ref}} \quad (2.107)$$

สำหรับความต้านทานเอาต์พุตก็เช่นเดียวกัน สามารถใช้สมการ (2.87) ขณะให้  $R_1 = 0$  จะความต้านทานเอาต์พุตของแหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์ดังนี้

$$R_o = \left( 1 + \frac{\beta R_2}{R_2 + (r_e \parallel R_{ref}) + r_{\pi 2}} \right) r_{o2} \cong \left( \frac{1 + g_{m2} R_2}{1 + g_{m2} R_2 / \beta} \right) r_{o2} \quad (2.108)$$

ส่วนถ้า  $\beta \gg 1$  และ  $g_{m2} R_2 \gg \beta$  แล้ว

$$R_o \cong (1 + g_{m2} R_2) r_{o2} \quad (2.109)$$

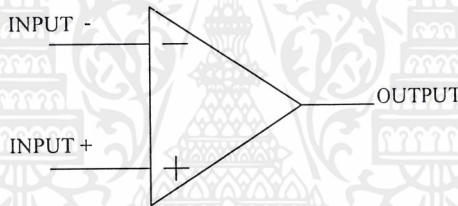


รูปที่ 2.30 แหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 วงจรกรองความถี่

อุปกรณ์ที่เป็นพื้นฐานสำคัญซึ่งใช้ในวงจรแอกติฟฟิลเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันแพร่หลายในวงจรอิเล็กทรอนิกส์นั่นก็คือ โอเปอเรชันแนล แอมพลิไฟเออร์ ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า ออปแอมป์ สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าที่ใช้แทนออปแอมป์ แสดงไว้ตามรูปที่ 2.31 โดยมีขาเพียง 3 ขาเท่านั้น ซึ่งเป็นขาหลักของอุปกรณ์ออปแอมป์ ประกอบด้วยขาอินเวอร์ตติ้ง อินพุต แสดงด้วยเครื่องหมายลบ ขานอน-อินเวอร์ตติ้ง อินพุต แสดงด้วยเครื่องหมายบวก และ ขาเอาต์พุต แต่ตามสภาพอุปกรณ์จริงนั้นออปแอมป์ที่ใช้จะมีด้วยกันหลายขา โดยมีขาหลักสำคัญเพียง 3 ขาที่กล่าวมาแล้วนั้น สำหรับขาประกอบอื่น ๆ ของไอซีออปแอมป์นี้สามารถหาดูได้จากคู่มือของผู้ผลิต ซึ่งจะมีรายละเอียดทางวิชาการต่าง ๆ อาทิเช่น ขาที่ต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยง ขาชดเชยทางด้านความถี่ขาปรับออฟเซ็ทเป็นศูนย์ เป็นต้น



รูปที่ 2.31 สัญลักษณ์ของคิฟเฟอเรนเชียล ออปแอมป์

สมการที่จะได้พบในบทต่อไปนั้น ได้มาจากการสมมติให้ค่าแรงดันหรือค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมระหว่างขาอินพุตทั้งสองของออปแอมป์เป็นศูนย์ หมายความว่าไม่มีกระแสไหลเข้าไปในขาทั้งสองของตัวออปแอมป์เลย แต่ในทางปฏิบัติจริงแล้วสามารถทำได้ใกล้เคียงมากที่สุดกับออปแอมป์ในความคิดทางอุดมคติ โดยเลือกออปแอมป์ให้เหมาะสมตามลักษณะงาน ซึ่งจะพิจารณาเลือกจากรายละเอียดทางวิชาการในเอกสารข้อมูลทดสอบ ออปแอมป์ตามรูปที่ 2.31 มีชื่อเรียกว่า คิฟเฟอเรนเชียล-อินพุต แอมพลิไฟเออร์ หรือวงจรขยายความแตกต่างของสัญญาณทางขาเข้า ซึ่งเป็นออปแอมป์ที่ผลิตกันมากและมีใช้กันอย่างแพร่หลายในส่วนต่างๆ ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปออปแอมป์ที่เราใช้กันในสภาวะการทำงานปกติ และต้องการเสถียรภาพในการทำงานที่ดีนั้นจะต้องทำการชดเชยความถี่ ให้กับตัวไอซีออปแอมป์ในบางชนิด อาทิเช่น ไอซีออปแอมป์เบอร์ 741 ที่ผลิตออกวางขายในท้องตลาด ส่วนใหญ่จะใช้ชื่อเรียกหลายแบบด้วยกันแล้วแต่บริษัทผู้ผลิต เช่น A741, AD741, MC741, LM741, RC741, SN72741, CA3056A เหล่านี้เป็นต้น สำหรับไอซี ออปแอมป์ชนิดอื่น ๆ หรือเบอร์อื่น ๆ ที่มีการชดเชยความถี่ก็มีเบอร์ 536, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

107, 5556, 740 และ 747 (เฉพาะ 747 เบอร์นี้มีไอซีออปแอมป์ 741 อยู่ภายใน 2 ตัวด้วยกัน) ส่วนออปแอมป์เบอร์อื่นที่ต้องทำการชดเชยความถี่ข้างนอกตัวไอซีออปแอมป์เองนั้นทางผู้ผลิตจะระบุมาให้ทราบใน (Data sheet) โดยทั่วไปมักพบในออปแอมป์ประเภทใช้งานที่ความถี่สูง และต้องการอัตราขยายสูงด้วย ตัวอย่างของออปแอมป์ประเภทนี้เช่น เบอร์ 709, 748, 101 และ 531 เป็นต้น และเพื่อให้งจรกรองความถี่ต่อตามรูปแบบต่างๆ ในหนังสือในที่นี่ได้ผลใกล้เคียงการออกแบบมากที่สุด ผู้ออกแบบควรเลือกใช้ไอซีออปแอมป์ซึ่งมีคุณสมบัติทางด้านอัตราขยายและการตอบสนองเชิงความถี่ครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการทั้งหมด ตัวอย่างเช่น ควรเลือกใช้ไอซีออปแอมป์เบอร์ที่มีค่าอัตราขยายวงจรรอบเปิด อย่างน้อย 50 เท่าของอัตราขยายของวงจรกรองความถี่ที่ออกแบบไว้ เป็นต้น

### 2.7.1 ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ใช้งาน

โดยการใช้งานทั่วไปจะมีตัวต้านทานที่ใช้ด้วยกันอยู่ 3 แบบ แบบแรกซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง และใช้ในวงจรกรองความถี่ที่ต้องการความเที่ยงตรงไม่สูงมากนัก คือตัวต้านทานแบบผงคาร์บอนอัดหรือคาร์บอนรีซิสเตอร์ โดยวงจรกรองความถี่ที่ใช้งานจะทำงานได้ดีเมื่ออยู่ในอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิปกติ (เท่ากับ 25 องศาเซลเซียส) วงจรกรองความถี่ทุกแบบจะใช้ตัวต้านทานแบบคาร์บอนทั้งหมด (มีค่าผิดพลาด 5%) เหตุผลที่เลือกใช้ตัวต้านทานชนิดนี้เพราะมีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย ส่วนวงจรกรองความถี่ที่ต้องการความแม่นยำและความเที่ยงตรงของการกรองความถี่สูง หรือใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่อุณหภูมิซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ผู้ออกแบบอาจจะเลือกใช้ตัวต้านทานอีก 2 แบบที่เหลือ ซึ่งให้ความเที่ยงตรงมากกว่าและมีค่าผิดพลาดน้อย คือแบบเมทอลฟิล์ม หรือแบบไวร์-วาวด์ ในกรณีของตัวเก็บประจุนั้นแบบเซรามิก ดิสค์ เป็นแบบที่ใช้งานกันทั่วไปและมีราคาถูกเช่นเดียวกับตัวต้านทานแบบผงคาร์บอนอัด คือมักใช้ในวงจรกรองความถี่ที่ต้องการความเที่ยงตรงไม่สูงมากนัก แต่อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ส่วนตัวเก็บประจุที่มีความเที่ยงตรงมากกว่าแบบเซรามิก ดิสค์ และใช้งานในวงจรกรองความถี่คือ แบบไมลาร์ สำหรับวงจรกรองความถี่ที่ต้องการความแน่นอนและความเที่ยงตรงของการกรองความถี่สูง นิยมใช้ตัวเก็บประจุแบบโพลิสไต้ลีน และแบบเทฟลอน วงจรกรองความถี่ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีการออกแบบกันหลายอย่าง เช่น การออกแบบโดยการคำนวณ และยังมีอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจเพราะสามารถออกแบบได้รวดเร็วและง่ายต่อการออกแบบด้วย วิธีนี้ก็คือ การใช้กราฟในการคำนวณ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

## 2.7.2 วงจรกรองความถี่ที่ออกแบบโดยการคำนวณ

### 1) วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับที่ 1 แบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน

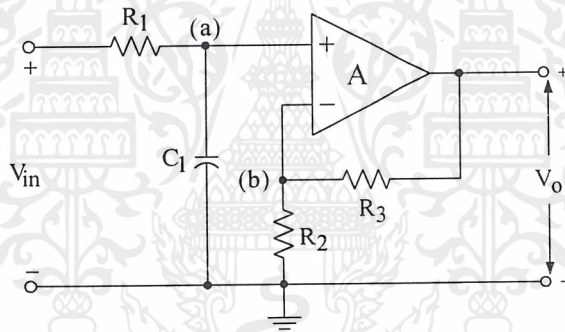
วงจรกรองความถี่ไม่กลับเฟสเป็นวงจรขยายในรูปของแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน มีเกนที่การขยายสูงเกนที่การขยายของวงจรจะขึ้นอยู่กับค่าของ  $R_3$  และ  $R_2$  ( $K = 1 + R_3 // R_2$ )

วงจรทำหน้าที่กรองความถี่โดย R-C ที่นำมาประกอบวงจรซึ่งเป็นวงจรขยายแบบคาสโคด

การวิเคราะห์ห้วงจรที่ โหนด (a) และ (b) จะได้อัตรา

โหนด (a)

$$\frac{V_a - V_i}{R_1} = j\omega C_1 V_a = 0 \quad (2.110)$$



รูปที่ 2.32 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับที่ 1 แบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน

หรือ

$$V_a \left( \frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right) = \frac{V_i}{R_1}$$

โหนด (b)

$$\frac{V_b - V_o}{R_3} + \frac{V_b}{R_2} = 0$$

หรือ

$$V_b = \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{V_o}{R_3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_b = \left( \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) V_o \quad (2.111)$$

และ  $V_o = A(V_a - V_b)$ ,  $(V_a - V_b) = V_o / A$  ให้  $A=0$  ดังนั้นจะได้  $V_a \approx V_b$

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{K(1/C_1 R_1)}{j\omega + 1/C_1 R} \quad (2.112)$$

เมื่อ  $K = 1 + R_3 / R_2$  เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ วงจรกรองความถี่ต่ำ จะได้

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{k b_0 \omega_0}{j\omega + b_0 \omega_0} \quad (2.113)$$

จากสมการที่ (2.110) และ (2.111) จะได้  $b_0 \omega_0 = 1/C_1 R_1$ ,  $K = 1 + R_3 / R_2$  เราจะเห็นว่าทั้งสองสมการ เรายังไม่ทราบค่าของตัวเก็บประจุในวงจร ซึ่งมีการเลือกค่าของตัวเก็บประจุ เราจะกำหนดขึ้นเพื่อให้เกี่ยวข้องกับความต้านทาน

$$C_1 = \frac{10}{f_c} \mu F \quad (2.114)$$

ซึ่ง  $f_c$  คือ ค่าความถี่คัตออฟ (Hz)

## 2) วงจรกรองความถี่อันดับที่ 2 แบบ แหล่งจ่ายควบคุมด้วยแรงดัน

วงจรกรองความถี่ถูกออกแบบโดย Sallen และ Key และการออกแบบวงจรจะกระทำได้ง่ายขึ้น เพื่อให้การขยายของวงจรกรองความถี่แบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดันให้เป็นไปตามการออกแบบไว้ โครงสร้างของวงจรกรองความถี่แบบไม่กลับเฟสซึ่งจะต้องทำการกำหนดค่าความไว(Q)ให้กับวงจรถ่วง ( $K=1+(R_6/R_5)$ ) เพราะวงจรจะมีความไวในการทำงานสูง ถ้าค่า Q ต่ำ และอัตราการขยายต่ำ ทำให้มีผลต่อความถี่ สามารถแสดงในรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$\omega_0$  ที่ 3dB ในวงจรกรองความถี่ และ  $b_0\omega_0$  เป็นขอบของการกระเพื่อมของความถี่ สัมประสิทธิ์ของ  $b_0, b_1$  และอื่นๆ จะต้องมามีค่าที่เหมาะสมกับเงื่อนไขของผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสมการ 2.113 และ 2.114 จะได้

$$b_0\omega_0^2 = \frac{1}{C_1C_2R_1R_2} \quad (2.130)$$

$$b_1\omega_0 = \frac{1}{C_2R_1} + \frac{1}{C_2R_2} + \frac{1}{C_1R_2} + \frac{K}{C_1R_2}$$

เมื่อเราทำการออกแบบค่าอุปกรณ์ต่างๆ เราจะทำการออกแบบ ให้  $\omega_0^2 = 1 \text{ rad/s}$   $C_1=C_2=1\text{F}$  จะได้

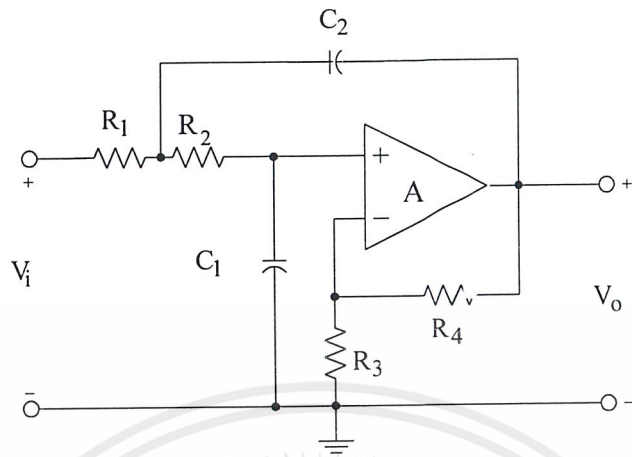
$$b_0 = \frac{1}{R_1R_2}$$

$$b_1 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}(2-K) \quad (2.131)$$

จะสังเกตได้ว่าสมการต่าง ๆ ที่ผ่านมา เป็นการเลือกหรือกำหนดค่าต่าง ๆ ซึ่งอาจจะเป็นวงจรที่ไม่เหมือนใครหรืออาจจะดูแปลกไปจากวงจรอื่นก็ได้ จากสมการ  $R_1 = 1/b_0R_2$  และเมื่อแทนค่า ในสมการอีกสมการจะได้

$$R_2 = (b_1 \pm \sqrt{(b_1 - 4b_0(2-K))/2b_0}) \quad (2.132)$$

ดังนั้น เราจะทราบว่าค่าของตัวเก็บประจุ  $C_1, C_2$  และค่าความต้านทาน  $R_1, R_2$  เราจะทราบว่าค่าของความต้านทาน  $R_3, R_4$  จากการออกแบบวงจรทางด้านไฟกระแสตรง ซึ่งจะทำการปลดคาปาซิเตอร์ออกทุกตัวในวงจร



รูปที่ 2.33 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 แบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{\frac{1}{R_1 R_2} \left( \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) / \frac{1}{R_4}}{\left( \frac{1}{R_2} + j\omega C_1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + j\omega C_2 \right) - \frac{1}{R_2^2} - \frac{j\omega C_2}{R_2} \left( \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) / \frac{1}{R_4}} \quad (2.128)$$

ถ้า  $K = 1 + R_4/R_3$  ซึ่งเป็นอัตราขยายทางด้านฟระแสดตรงสามารถเขียนได้ดังรูป

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2} K}{-\omega^2 + j\omega \left\{ \frac{1}{C_2 R_1} + \frac{1}{C_2 R_2} + \frac{1}{C_1 R_2} - \frac{K}{C_1 R_2} \right\} + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.129)$$

ถ้าเราให้  $\omega_o^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}$  ทำการแทนค่าในสมการจะทำให้ได้สมการ พื้นฐานของ

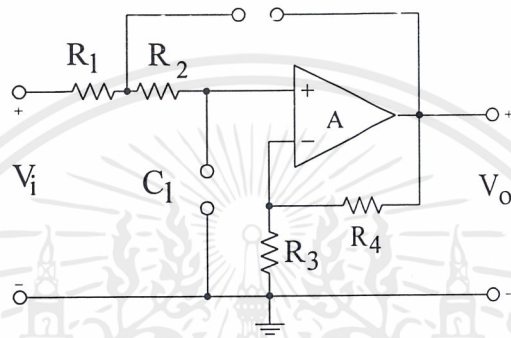
วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{K b_o}{-\omega^2 + j b_1 \omega \omega_o + b_o \omega_o^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากส่วนของไฟกระแสตรง;  $V_+ = V_-$  หรือ  $V(R_1 + R_2) = V(R_3 // R_4)$   
 ดังนั้น

$$R_1 + R_2 = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_4 / R_3}{1 + R_4 / R_3} \quad (2.133)$$



รูปที่ 2.34 การวิเคราะห์ส่วนของ ไฟกระแสตรง ของวงจรกรองความถี่อันดับ 2 ถ้าให้

$$\frac{R_4}{R_3} = K - 1 = K(R_1 + R_2) \quad (2.134)$$

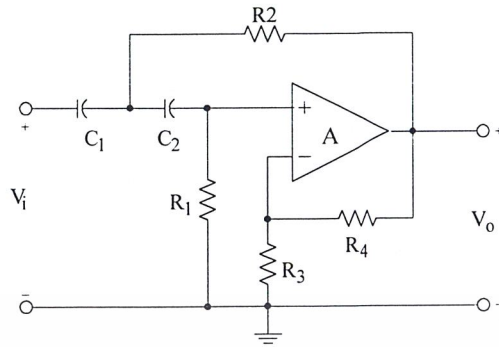
ดังนั้น

$$R_3 = \left(\frac{K}{K-1}\right)(R_1 + R_2); R_4 = K(R_1 + R_2) \quad (2.135)$$

### 3) วงจรกรองความถี่สูงแบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน

วงจรกรองความถี่สามารถกำหนดความถี่คัตออฟ ได้จาก  $R_1, R_2, C_1$  และ  $C_2$  ซึ่งลักษณะของวงจรกรองความถี่สูงจะแตกต่างจากวงจรกรองความถี่ต่ำ อยู่ที่ว่ารูปร่างของวงจร สลับสับเปลี่ยนกันระหว่าง  $R_1, R_2, C_1, C_2$  โดย  $R_1$  และ  $C_1$  จะสลับกัน และ  $R_2$  กับ  $C_2$  จะสลับกัน ซึ่งเป็นชุดแปลงความถี่ และใช้เป็นวงจรกรองความถี่สูงมีรายละเอียดคล้ายกับวงจรกรองความถี่ต่ำ ในการออกแบบวงจรกรองความถี่จะต้องมีรายละเอียดเกี่ยวกับความถี่คัตออฟ ขนาดของสัญญาณ และค่าต่างๆ ที่กำหนดในตารางการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 แบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน

วงจรกรองความถี่สูงจะมีค่าพารามิเตอร์ซึ่ง  
สามารถแสดงออกเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{-\omega^2 C_1 C_2 (1 + R_4 / R_3)}{(j\omega C_2 + \frac{1}{R_1})(j\omega C_1 + j\omega C_2 + \frac{1}{R_2}) + \omega^2 C_2^2 + \frac{j\omega C_2}{R_2} (1 + \frac{R_3}{R_4})} \quad (2.139)$$

และ

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{-\omega^2 C_1 C_2 K}{-\omega^2 C_1 C_2 - \omega^2 C_2^2 + \frac{j\omega C_2}{R_2} + \omega^2 C_2^2 + \frac{j\omega C_1}{R_1} + \frac{j\omega C_2}{R_2} + \frac{1}{R_1 R_2} - \frac{j\omega C_2 K}{R_2}} \quad (2.140)$$

เราจะทำการแก้ไขให้ง่ายขึ้นดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{-\omega^2 K}{-\omega^2 + j\omega \left( \frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_2 R_2} + \frac{(1-K)}{C_1 R_2} \right) + \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (2.141)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2.132 สามารถเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่สูงได้ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{-\omega^2 K}{-\omega^2 + j\omega\omega_o B_1 + B_o\omega_o^2} \quad (2.142)$$

จากเงื่อนไข ดังนี้  $B_o = \frac{1}{b_o}$  ,  $B_1 = \frac{b_1}{b_o}$

$$B_o\omega_o^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}$$

$$B_1\omega_o = \frac{(1-K)}{C_1 R_2} + \frac{1}{C_1 R_1} + \frac{1}{C_2 R_1} \quad (2.143)$$

เราจะทำการ normalising  $\omega, C_1, C_2$  กำหนดให้  $\omega_o = 1 \text{ rad/s}, C_1 = C_2 = 1 \text{ F}$

$$B_o = \frac{1}{R_1 R_2} \quad \text{และ} \quad B_o R_2 = \frac{1}{R_1}$$

$$B_1 = \frac{(1-K)}{C_1 R_2} + 2B_o R_2 \quad (2.144)$$

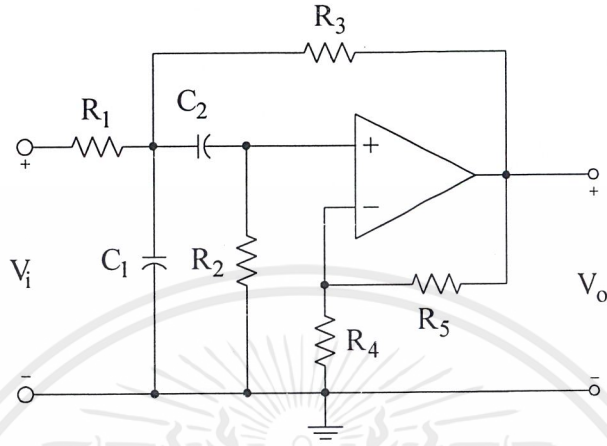
จะได้

$$R_2 = \frac{[-B_1 \pm (B_1^2 - 8B_o(1-K)^{0.5})]}{4B_o} \quad (2.145)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.3 วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่แบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน

โครงสร้างพื้นฐานของวงจรกรองความถี่เฉพาะย่าน มีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 2.36 วงจรกรองแถบความถี่เฉพาะแบบแหล่งจ่ายแรงดันควบคุมด้วยแรงดัน

จากรูป  $V_c = \frac{V_o}{K}$

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_5} \quad (2.146)$$

ให้  $V_b \approx V_c$

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{j\omega K / C_2 R_1}{-\omega^2 + \frac{j\omega}{C_2} \left[ \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_2} (1-K) + \frac{C_3}{C_1 R_3} \right] + \frac{(R_1 + R_2)}{C_1 C_2 R_1 R_2 R_3}} \quad (2.147)$$

ถ้าเราคิดอัตราขยายของวงจรกรองแถบความถี่

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{j\omega \omega_o G / Q}{-\omega^2 + j\omega \omega_o / Q + \omega_o^2} \quad (2.148)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ค่าต่าง ๆ อัตราขยายความถี่(G) ความถี่คัตออฟ (fc) และค่า Q ของวงจรจะคิดในย่าน Band width 3 dB

$$f = f_2 - f_1 = f_o / Q \quad (2.149)$$

ความสัมพัทธ์ต่างๆ

เมื่อกำหนดให้  $C_1 = C_2 = 1F, \omega_o = 1rad/s$  จะได้

$$\frac{G}{Q} = \frac{K}{R_1} = KG$$

$$\frac{1}{Q} = G_1 + G_2(1-K) + 2G_3 \quad (2.150)$$

$$G_3 = \frac{1}{G_1 + G_2} \quad (2.151)$$

เมื่อ

$$G_1 = \frac{1}{R_1}$$

จากวงจรกรองถ้ากำหนดให้  $K = 2$  จะทำให้ค่าของ  $R_4 = R_5$  จากค่า  $K = 2$  จะทำการออกแบบจากสมการจะได้เป็น

$$G_1 = \frac{G}{2Q}$$

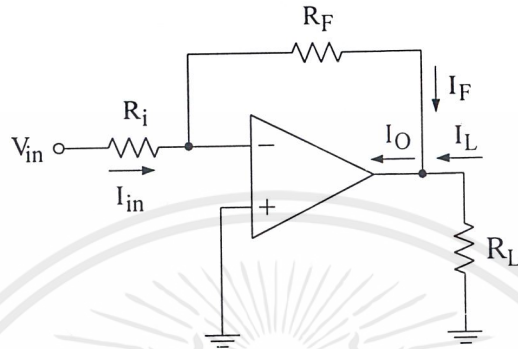
$$G_3 = \frac{1}{G_1 + G_2} \quad (2.152)$$

- order เพราะค่าบนกราฟจะแสดงที่แกน (j $\omega$ ) จึงต้องทำให้วงจรมีอัตราขยายต่ำ และค่า Q จะต้องต่ำด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 วงจรขยายออปแอมป์

### 2.8.1 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส



รูปที่ 2.37 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส

จากรูปเป็นวงจขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสจะประกอบด้วย  $V_{in}$  เป็นแหล่งจ่ายอินพุต  $R_i$  เป็นความต้านทานที่ต่อจากแหล่งจ่ายและเป็นความต้านทานที่ควบคุมการไหลของกระแส  $R_f$  เป็นความต้านทานป้อนกลับ การหากระแสที่ไหลผ่าน  $R_i$  เข้าสู่วงจร เรียกว่า กระแส  $I_i$  หาได้จาก

$$I_i = \frac{V_i}{R_i} \quad (2.153)$$

การหากระแสที่ไหลผ่าน  $R_f$  เข้าสู่วงจร เรียกว่า กระแส  $I_f$  หาได้จาก

$$I_f = I_i \quad (2.154)$$

เพราะว่า  $I_f$  ไหลผ่าน  $R_f$  จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $R_f$  เรียกว่า  $V_{R_f}$  หาได้จาก

$$V_{R_f} = I_f R_f = I_i R_f \quad (2.155)$$

การหาแรงดันทางเอาต์พุต หรือแรงดันตกคร่อม  $R_L$  หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = VR_L = VR_F = I_i R_F \quad (2.156)$$

จากวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบ กลับเฟส สัญญาณทางด้านเอาต์พุต จะกลับเฟสกับสัญญาณอินพุต  $180^\circ$

$$\theta = 180^\circ$$

การหากระแสที่ไหลผ่านโหลดหรือ  $R_L$  หาได้จาก

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} \quad (2.157)$$

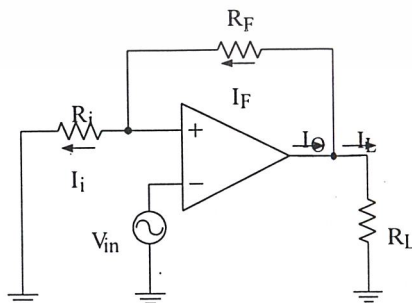
การหากระแสที่ไหลจาก  $R_F$  และ  $R_L$  มารวมกันเรียกว่า กระแส  $I_o$  หาได้จาก

$$I_o = I_F + I_L \quad (2.158)$$

ซึ่ง  $I_o$  ที่ไหลเข้าสู่ ออปแอมป์ 741 สูงสุดเท่ากับ 5 mA อัตราขยายของวงจร หาได้จาก

$$A_{cl} = \frac{R_F}{R_i} \quad (2.159)$$

### 2.8.2 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส



รูปที่ 2.38 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสจะเหมือนกับวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสเพียงแต่วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสจะมีแหล่งจ่ายต่อเข้ากับขา Non-Inverting ของออปแอมป์ และ สัญญาณทางด้านเอาต์พุตจะตรงกับสัญญาณทางด้านอินพุต จากวงจรสามารถหาค่าต่างๆ ได้ดังนี้

การหากระแสที่ไหลผ่าน  $R_i$  เข้าสู่วงจร เรียกว่า กระแส  $I_i$  หาได้จาก

$$I_i = \frac{V_i}{R_i} \quad (2.160)$$

การหากระแสที่ไหลผ่าน  $R_F$  เข้าสู่วงจร เรียกว่า กระแส  $I_F$  หาได้จาก

$$I_F = I_i \quad (2.161)$$

เพราะว่า  $I_F$  ไหลผ่าน  $R_F$  จึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม  $R_F$  เรียกว่า  $VR_F$  หาได้จาก

$$VR_F = I_F R_F = I_i R_F \quad (2.162)$$

การหาแรงดันทางเอาต์พุต หรือแรงดันตกคร่อม  $R_L$  หาได้จาก

$$V_o = VR_F + VR_i \quad (2.163)$$

$$V_o = VR_F + V_i \quad (2.164)$$

จากวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสสัญญาณทางด้านเอาต์พุตจะมีเฟสตรงกับสัญญาณอินพุต

$$\theta = 0^\circ$$

การหากระแสที่ไหลผ่านโหลดหรือ  $R_L$  หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} \quad (2.165)$$

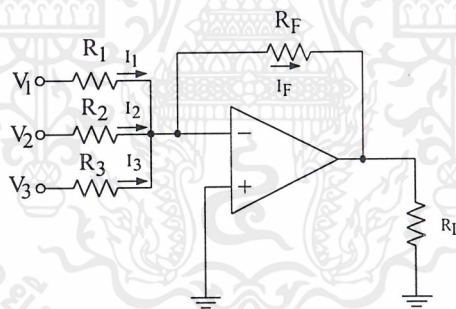
การหากระแสที่ไหลจาก  $R_F$  และ  $R_L$  มารวมกันเรียกว่ากระแส  $I_O$  หาได้จาก

$$I_o = I_F + I_L \quad (2.166)$$

ซึ่ง  $I_o$  ที่ไหลเข้าสู่ ออปแอมป์ 741 สูงสุดเท่ากับ 5 mA อัตราขยายของวงจร หาได้จาก

$$A_{cl} = \frac{R_F}{R_i} + 1 \quad (2.167)$$

### 2.8.3 วงจรขยายผลรวม



รูปที่ 2.39 วงจรขยายผลรวม

วงจรผลรวมจะคล้ายกับวงจรออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสแต่จะต่างกันว่า ทางด้านอินพุตจะมีหลายอินพุตมารวมกันที่จุดหนึ่งซึ่งเรียกจุดนั้นว่าจุดขยายผลจากรูปที่ 2.39 จะสามารถคำนวณหาค่าต่างๆ ของวงจรได้จาก

การหาค่ากระแส  $I_1, I_2$  และ  $I_3$  หาได้จาก

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1}, I_2 = \frac{V_2}{R_2}, I_3 = \frac{V_3}{R_3} \quad (2.168)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุต หาได้จาก

$$V_o = -(I_1 + I_2 + I_3)R_F \quad (2.169)$$

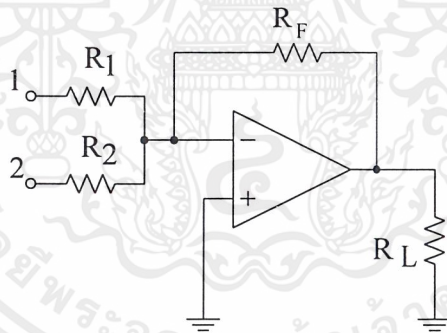
หรือ

$$V_o = -\left( \frac{R_F}{R_1}V_1 + \frac{R_F}{R_2}V_2 + \frac{R_F}{R_3}V_3 \right) \quad (2.170)$$

หรือ

$$V_o = -(V_1 + V_2 + V_3) \quad (2.171)$$

#### 2.8.4 วงจรหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 2.40 วงจรหาค่าเฉลี่ย

วงจรหาค่าเฉลี่ยจะมีลักษณะเหมือนกับวงจรขยายผลรวม แต่ต่างกันที่ค่าความต้านทานทางด้านอินพุต จะต้องเท่ากันทุกตัว จากรูปสามารถหาค่าต่างๆ ของวงจรหาได้จากกรหาค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุต เรียกว่า  $V_o$  หาได้จาก

$$V_o = -\left( \frac{V_1 + V_2 + V_3}{n} \right) \quad (2.172)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $n$  คือจำนวนอินพุตของวงจร  
การหาค่าความต้านทานอินพุตของวงจร หาได้จาก

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_{(etc)} \quad (2.173)$$

การหาค่าความต้านทานป้อนกลับ  $R_F$  หาได้จาก

$$R_F = \frac{R}{n} \quad (2.174)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบ การสร้างและการทำงาน

#### 3.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัวจะทำการออกแบบใน ส่วนของวงจรต่างๆ ที่จะนำมาสร้างเป็นชุดทดลองซึ่งการออกแบบจะใช้วิธีการคำนวณออกแบบหา ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของวงจรมันๆ และทดสอบผลการออกแบบโดยการใช้โปรแกรม Pspice ซึ่งวิธี การออกแบบของแต่ละวงจรจะขอกกล่าวดังต่อไปนี้

#### 3.2 การออกแบบชุดทดลอง

ส่วนของชุดปฏิบัติการทดลอง จะมีลักษณะเป็นบอร์ดทดลอง ซึ่งประกอบด้วยวงจรกิจกรรมแรงดัน วงจรเครื่องวัดมัลติมิเตอร์ และแผงวงจรสำหรับการทดลอง อยู่ภายนอก เพื่อนำมาเสียบเข้ากับบอร์ดการทดลอง ในส่วนของแผงวงจรสำหรับการทดลอง จะแบ่งออกเป็น

- 1) วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม
- 2) วงจรขยายเบสร่วม
- 3) วงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม
- 4) วงจรขยายซอสร่วม
- 5) วงจรขยายเดรนร่วม
- 6) วงจรขยายเกทร่วม
- 7) วงจรแหล่งจ่ายกระแสไมโคร
- 8) วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต
- 9) วงจรแหล่งจ่ายกระแสแบบคาสโคด
- 10) วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิลสัน
- 11) วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์
- 12) วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์
- 13) วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า
- 14) วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1
- 15) วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 16) วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2
- 17) วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2
- 18) วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่
- 19) วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส
- 20) วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส
- 21) วงจรออปแอมป์พื้นฐานสองตัว
- 22) วงจรขยายผลต่างแบบที่ใช้ออปแอมป์
- 23) วงจรผลรวม
- 24) วงจรค่าเฉลี่ย

ในแต่ละใบงานนั้นจะประกอบอยู่บนแผงวงจรทดลอง เพื่อให้ง่ายสำหรับการนำมาใช้งานการจัดเก็บ แผงวงจรทดลองจึงมีขนาดเล็ก และใบงานบางส่วนจะเป็นการนำเอาแผงทดลองมากกว่า 1 แผงมาประกอบวงจร จึงทำให้เกิดทักษะและมีการประยุกต์การใช้งานมากขึ้นทำให้เกิดความเข้าใจได้ดี โดยมีจุดสำหรับต่ออุปกรณ์หรือเพื่อปรับเปลี่ยนค่าของอุปกรณ์ ในกรณีที่ต้องการเปลี่ยนค่าและมีจุดทดสอบสำหรับวัดสัญญาณ

โดยที่แผงวงจรนี้จะเทียบเข้ากับบอร์ดการทดลอง เพื่อนำมาวัดหาค่าเอาต์พุตและค่าที่จุดต่าง ๆ การออกแบบของวงจรต่าง ๆ มีการออกแบบดังนี้

### 3.3 การออกแบบวงจร

#### 3.3.1 การออกแบบวงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์

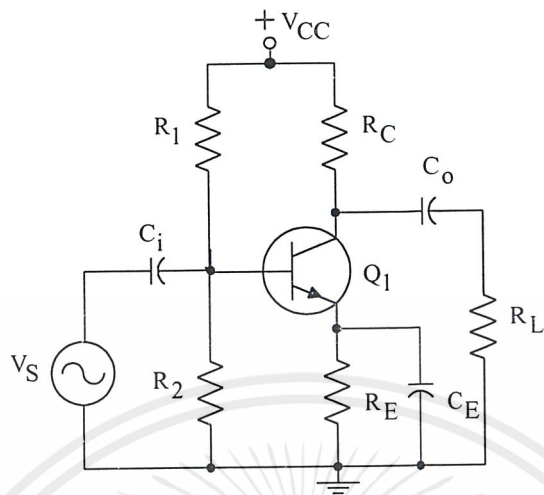
การออกแบบวงจขยายพื้นฐานผู้ออกแบบจะต้องเป็นผู้กำหนดความต้องการพื้นฐาน ต่างๆ ของวงจร เช่น  $V_{CC}$ ,  $I_{CQ}$ ,  $I_B$ ,  $\beta$  และค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ใช้ในการออกแบบวงจรโดยที่การกำหนดจะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติหรือข้อมูลต่างๆ ของทรานซิสเตอร์ที่เลือกใช้ด้วย ซึ่งการออกแบบจะแบ่งออกตามรูปแบบของวงจรได้ดังนี้

##### 1) การออกแบบวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมจะป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขาเบสและเอาต์พุตออกที่ขาคอลเลคเตอร์ ซึ่งคุณสมบัติพื้นฐานอิมิตเตอร์ร่วมคือ สัญญาณที่เอาต์พุตมีเฟสต่างกับสัญญาณอินพุต 180 องศา มีอัตราการขยายแรงดันค่อนข้างสูง มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ปานกลาง

รูปวงจรพื้นฐานของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งการออกแบบวงจรจะมีขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่ใช้ในการออกแบบ

### 1.1) การออกแบบวงจรไบแอสของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 ซึ่งจากข้อมูลในคู่มือทรานซิสเตอร์ สามารถกำหนดจุดทำงานของวงจรได้ดังนี้

$$I_{CQ} = 10 \text{ mA}$$

$$\beta_{(\min)} = 100$$

$$V_{CC} = 15 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{3}$$

$$= \frac{15 \text{ V}}{3} = 5 \text{ V}$$

คำนวณหาค่าความต้านทาน  $R_E$

กำหนดให้

$$V_{RE} = \frac{V_{CC}}{3} = \frac{15 \text{ V}}{3} = 5 \text{ V}$$

$$\begin{aligned}
 R_E &= \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{5 \text{ V}}{I_C + I_B} \\
 &= \frac{5 \text{ V}}{I_C + (I_C/\beta)} \\
 &= \frac{5 \text{ V}}{10 \text{ mA} + (10 \text{ mA}/100)} \\
 &= 495 \Omega
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าความต้านทาน  $R_C$

$$\begin{aligned}
 R_C &= \frac{V_{CC} - V_{CEQ} - V_{RE}}{I_C} \\
 &= \frac{15 \text{ V} - 5 \text{ V} - 5 \text{ V}}{10 \text{ mA}} \\
 &= 500 \Omega
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่า  $R_1$  และ  $R_2$  จาก

$$\begin{aligned}
 R_B &= \frac{(1 + \beta)R_E}{10} \\
 &= \frac{(1 + 100) \times 495}{10} \\
 &\approx 5 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

และ

$$V_B = V_{BE} + (I_B \cdot R_B) + V_{RE}$$

$$V_B = 0.7 \text{ V} + (10 \text{ mA} \times 5 \text{ k}\Omega) + 5 \text{ V}$$

$$= 6.2 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$R_1 = \frac{R_B \cdot V_{CC}}{V_B} = \frac{5 \text{ k}\Omega \times 15 \text{ V}}{6.2 \text{ V}} = 12.1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_B \cdot V_{CC}}{(V_{CC} - V_B)} = \frac{5 \text{ k}\Omega \times 15 \text{ V}}{(15 \text{ V} - 6.2 \text{ V})} = 8.52 \text{ k}\Omega$$

เลือกใช้ค่าความต้านทาน  $R_2 = 8.6 \text{ k}\Omega$

### 1.2) การออกแบบอัตรการขยายแรงดันของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

การออกแบบวงจรขยายเพื่อให้ได้อัตราการสูงสุดจะใช้วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่มีการบายพาสส์ทั้งหมดและกำหนดให้ความต้านทานที่โหลดมีค่าสูงมากๆ ทำให้  $Z_C = R_C$  และ  $Z_E = 0$  ซึ่งทำให้ได้ค่าอัตราการขยายสูงสุดดังนี้

$$A_{V(\max)} = \frac{-\beta \cdot R_C}{r_b + r_\pi} = \frac{-100 \times 500}{100 + 260} = -138.88 \text{ เท่า}$$

ส่วนค่าอัตราการขยายของวงจรในกรณีที่มีโหลด สามารถคำนวณอัตราการขยายแรงดันได้จากสมการดังนี้

$$A_V = \frac{-\beta \cdot Z_C}{r_b + r_\pi + (1 + \beta) \cdot Z_E}$$

### 1.3) การคำนวณหาค่าของตัวเก็บประจุที่ในวงจร

กำหนดให้วงจรตอบสนองต่อความถี่ต่ำมีความถี่คัทออฟทางด้านต่ำ 500 Hz และ  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$  จะได้อัตราตัวเก็บประจุที่ใช้งานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงทางอินพุต

$$C_i = \frac{1}{2\pi f_L (R_B \parallel (r_b + r_\pi))}$$

$$C_i = \frac{1}{2\pi \times 500 \times 335.94 \ \Omega}$$

$$= 0.94 \ \mu F$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า 1  $\mu F$

ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงทางเอาต์พุต

$$C_o = \frac{1}{2\pi f_L (R_C + R_L)}$$

$$= 0.030 \ \mu F$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า 1  $\mu F$

ตัวเก็บประจุบายพาสส์

$$C_E = \frac{1}{2\pi f_L \left( R_E \parallel \left( \frac{r_b + r_\pi}{1 + \beta} \right) \right)}$$

$$= 90.17 \ \mu F$$

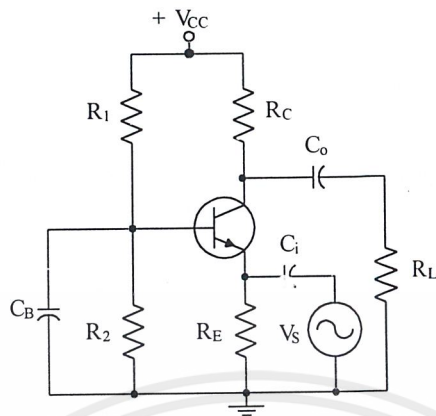
เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า 100  $\mu F$

## 2) การออกแบบวงจรขยายเบสรวม

### 2.1) การออกแบบวงจรไบแอสของวงจรขยายเบสรวม

วงจรไบแอสของวงจรขยายเบสรวมจะมีลักษณะเช่นเดียวกับวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม และสามารถที่จะใช้วงจรดังกล่าวสร้างเป็นวงจรขยายเบสรวมได้โดยการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าที่ขาอิมิตเตอร์ ส่วนสัญญาณเอาต์พุตจะออกทางขาคอลเลกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วงจรขยายเบสรวมที่ใช้ในการออกแบบ

## 2.2) การออกแบบอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายเบสรวม

การออกแบบวงจรขยายเบสรวมเพื่อให้ได้อัตราขยายสูงสุดจะใช้วงจรขยายเบสรวมที่มีการบายพาสส์ทั้งหมด คือ  $Z_B = 0$  และกำหนดให้ความต้านทานที่โหลดมีค่าสูงมากๆ ทำให้  $Z_B = R_C$  ซึ่งทำให้ได้ค่าอัตราขยายสูงสุดดังนี้

$$A_{V(\max)} = \frac{-\beta \cdot R_C}{r_b + r_\pi} = \frac{-100 \times 500}{100 + 260} = -138.88 \text{ เท่า}$$

ส่วนค่าอัตราขยายของวงจรในกรณีที่มีโหลดสามารถคำนวณค่าอัตราขยายแรงดันได้จากสมการดังนี้

$$A_V = \frac{-\beta \cdot Z_C}{r_b + r_\pi + Z_B}$$

## 2.3) การคำนวณหาค่าของตัวเก็บประจุที่ในวงจร

วงจรตอบสนองต่อความถี่ต่ำที่มีความถี่คutoffทางด้านต่ำ 500 Hz และ  $R_L = 10 \text{ kHz}$  จะได้ค่าตัวเก็บประจุใช้งานดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงทางอินพุต

$$C_i = \frac{1}{2\pi f_L (R_B \parallel (r_b + r_\pi))} = 0.94 \mu\text{F}$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงทางเอาต์พุต

$$C_o = \frac{1}{2\pi f_L (R_C + R_L)} = 0.030 \mu\text{F}$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า 1  $\mu\text{A}$

ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงทางอินพุต

$$C_i = \frac{1}{2\pi f_L \left( R_E \parallel \left( \frac{r_b + r_\pi}{1 + \beta} \right) \right)} = 3.56 \Omega$$

$$C_E = \frac{1}{2\pi \times 500 \times 3.53} = 90.17 \mu\text{F}$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า 100  $\mu\text{F}$

ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงทางเอาต์พุต

$$C_o = \frac{1}{2\pi f_L (R_C + R_L)} = 0.030 \mu\text{F}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า  $1\mu\text{F}$

ตัวเก็บประจุบายพาสส์

$$C_i = \frac{1}{2\pi f_L (R_B \parallel (r_b + r_\pi + (1 + \beta)R_E))}$$

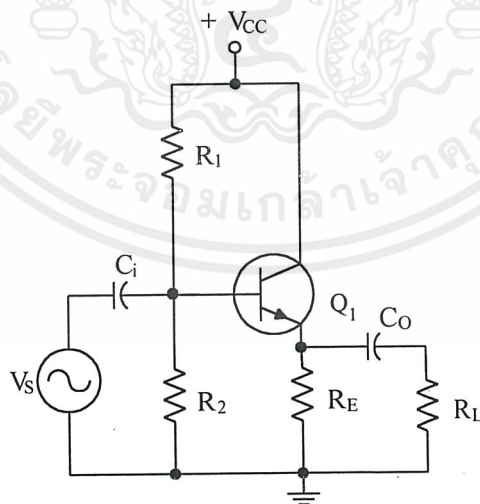
$$C_i = \frac{1}{2\pi \times 500 \times 4574.82 \Omega}$$

$$= 0.069 \mu\text{F}$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า  $1\mu\text{F}$

### 3) การออกแบบวงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม

วงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม เป็นวงจรที่ให้อัตราขยายประมาณ 1.0 สัญญาณเอาต์พุตมีเฟสเหมือนกับอินพุต มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าวงจรอิมิตเตอร์ฟอล์โลเวอร์เนื่องจากสัญญาณที่เอาต์พุตมีขนาดและเฟสใกล้เคียงกับอินพุต ส่วนลักษณะการไบแอสวงจรก็มีการไบแอสเหมือนกับวงจรขยายแบบอื่น ๆ



รูปที่ 3.3 วงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วมที่ใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1) การออกแบบวงจรไบแอสของวงจรคอลเลกเตอร์ร่วม

เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3904 โดยกำหนดจุดทำงานของวงจรดังนี้

$$I_{CQ} = 10 \text{ mA}$$

$$\beta_{(\min)} = 100$$

$$V_{CC} = 15 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2} = \frac{15 \text{ V}}{2} = 7.5 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2} = \frac{15 \text{ V}}{2} = 7.5 \text{ V}$$

คำนวณหาค่าความต้านทาน  $R_E$

$$V_{RE} = V_{CC} - V_{ECQ}$$

$$R_E = \frac{V_{CC} - V_{ECQ}}{I_E} = 742 \ \Omega$$

คำนวณหาค่า  $R_1$  และ  $R_2$

จาก

$$R_B = \frac{(1 + \beta) \cdot R_E}{10} \approx 7.5 \text{ k}\Omega$$

$$V_B = V_{BE} + (I_B \cdot R_B) + V_{RE} = 8.95 \text{ V}$$

$$R_1 = \frac{R_B \cdot V_{CC}}{V_B} = 12.56 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_B \cdot V_{CC}}{(V_{CC} - V_B)} = 18.89 \text{ k}\Omega$$

เลือกใช้ค่า  $R_1 = 12.7 \text{ k}\Omega$

เลือกใช้ค่า  $R_2 = 19.1 \text{ k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2) การออกแบบอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม

จาก

$$A_V = \frac{1}{1 + \frac{r_b + r_\pi}{(1 + \beta)(R_E \parallel R_L)}}$$

โดยที่  $r_b = 100 \Omega$

$$r_\pi = \frac{\beta \cdot V_T}{I_C} = 260 \text{ mV/A}$$

ดังนั้นอัตราขยายของวงจรในกรณีเป็นวงจรเปิด ( $R_L = \infty$ ) จะได้ดังนี้

$$A_V = \frac{1}{1 + \frac{r_b + r_\pi}{(1 + \beta) \cdot R_E}} = 0.99 \text{ เท่า}$$

### 3.3) การคำนวณค่าของตัวเก็บประจุที่ในวงจร

กำหนดให้วงจรตอบสนองต่อความถี่ต่ำมีความถี่คutoffทางด้านต่ำ 500 Hz และ  $R_L = 10 \text{ kHz}$  จะได้ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้งานดังนี้

ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงทางอินพุต

$$C_E = C_i = \frac{1}{2\pi f_L [R_B \parallel (r_b + r_\pi + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L))]} \\ = 0.046 \mu\text{F}$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า  $1 \mu\text{F}$

ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงทางเอาต์พุต

$$C_o = \frac{1}{2\pi f_L \left[ R_L + (R_E // \frac{r_b + r_\pi + R_B}{1 + \beta}) \right]}$$

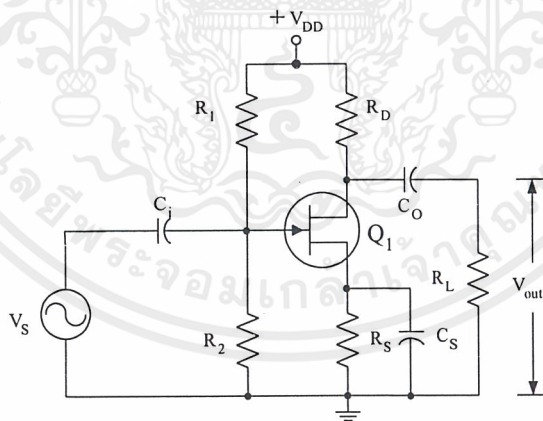
$$= 4.449 \mu F$$

เลือกใช้ตัวเก็บประจุค่า 10  $\mu F$

### 3.3.2 การออกแบบวงจรขยายที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

ในการออกแบบวงจรขยายโดยใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้านั้นจะต้องทราบถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันออกไปตามเบอร์ของทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ซึ่งในการออกแบบวงจรขยายทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าในชุดโครงการ ชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว นั้นได้เลือกเอาเบอร์ที่สามารถใช้กับโปรแกรม Pspice เพื่อเลียนแบบการทำงานจริง ทั้งใช้เบอร์ 2N3819 ที่มีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบดังในรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ได้แนบในส่วนท้ายของปริิญาานิพนธ์

#### 1) การออกแบบวงจรขยายขอสสร่วม



รูปที่ 3.4 วงจรขยายขอสสร่วมที่ใช้ในการออกแบบ

#### 1.1) การออกแบบวงจรไบแอสของวงจรขยายขอสสร่วม

เลือกจุดทำงานของวงจรดังนี้

$$V_{DD} = 15 \text{ V}$$

$$V_{GS} = -1.5 \text{ V}$$

$$V_{DS} = 5 \text{ V}$$

$$V_p = -3 \text{ V}$$

$$I_{DSS} = 10 \text{ mA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 + \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

$$= 2.5 \text{ mA}$$

คำนวณหาค่า  $R_S$  โดยกำหนด  $V_G$  ให้มีค่าแรงดัน ต่ำๆ คือ  $V_G = 3 \text{ V}$

$$V_S = V_G - V_{GS}$$

$$= 4.5 \text{ V}$$

$$R_S = \frac{V_S}{I_D}$$

$$= 1.8 \text{ k}\Omega$$

คำนวณ  $R_D$

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DS} - V_S}{I_D}$$

$$= 2.2 \text{ k}\Omega$$

เลือก  $R_{G2}$  เพื่อหา  $R_{G1}$  โดยที่  $R_{G2}$  ควรมีค่าสูงๆ เพื่อให้ได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูง

เลือก  $R_{G2} = 500 \text{ k}\Omega$

คำนวณหา  $R_{G1}$

$$R_{G1} = \frac{R_{G2} \cdot V_{DD}}{V_G} - R_{G2}$$

$$= 2 \text{ M}\Omega$$

จากการออกแบบจะได้ค่าความต้านทานต่างๆ ของวงจรขจรธรรม ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถใช้ได้กับทุกวงจรที่มีลักษณะเป็นวงจรขยายแบบแบ่งแรงดันดังรูป (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.2) การออกแบบอัตราขยายแรงดันของวงจรขยายข้อสร่วม

การออกแบบวงจรขยายเพื่อให้ได้อัตราการสูงสุดจะใช้วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่มีการบายพาสส์ทั้งหมดเช่นเดียวกับวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมซึ่งอัตราขยายแรงดันสูงสุดของวงจรในกรณีไม่คิดความต้านทานของโหลดจะมีค่าดังนี้

$$AV = -gmR_D$$

โดยที่

$$gm = \frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \left[ 1 + \frac{V_{GS}}{V_P} \right]$$

$$= 3.33 \text{ mS}$$

ดังนั้น

$$A_V = -(3.33 \times 10^{-3}) \times 2.2 \text{ k}\Omega$$

$$= -7.326 \text{ เท่า}$$

### 3.3) การคำนวณค่าของตัวเก็บประจุที่ในวงจร

กำหนดให้วงจรตอบสนองต่อความถี่ต่ำมีความถี่คutoffทางด้านต่ำ 500 Hz และ  $R_L = 10 \text{ kHz}$  จะได้ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้งานดังนี้  
ตัวเก็บประจุเชื่อม โยงอินพุต

$$C_i = \frac{1}{2\pi f_L R_G}$$

$$R_G = R_{G1} // R_{G2}$$

$$= 400 \text{ k}\Omega$$

$$C_i = \frac{1}{2\pi \times 500 \times 2.2 \text{ k}\Omega}$$

$$= 0.795 \text{ nF}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงเอาต์พุต

$$C_o = \frac{1}{2\pi f_L (R_D + R_L)}$$

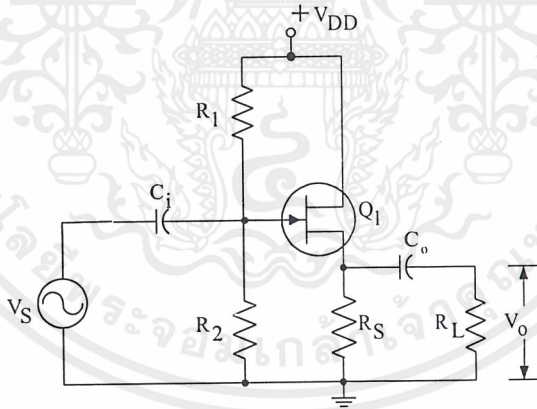
$$= 0.026 \mu\text{F}$$

ตัวเก็บประจุบายพาสส์

$$C_s = \frac{1}{2\pi f_L (R_S // \frac{1}{g_m})}$$

$$= 1.237 \mu\text{F}$$

## 2) การออกแบบวงจรขยายเดรนร่วม



รูปที่ 3.5 วงจรขยายเดรนร่วมที่ใช้ในการออกแบบ

การออกแบบวงจรขยายเดรนร่วมจะมีการออกแบบเหมือนกันกับทางวงจรขยายซอร์สร่วม เนื่องจากขยายแบบแบ่งแรงดันเหมือนกัน ดังนั้น ค่าความต้านทานต่าง ๆ จะมีค่าเหมือนกันกับค่าที่ออกแบบในวงจรขยายซอร์สร่วม แต่จะแตกต่างตรงส่วนของค่าคำนวณค่าอัตราขยายแรงดัน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

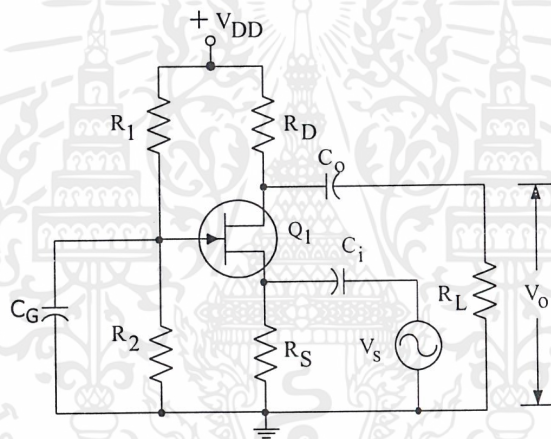
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AV = \frac{gm.R_D}{1 + gm.R_S}$$

$$= 1.04 \text{ เท่า}$$

### 3) การออกแบบวงจรเกทร่วม

การออกแบบวงจรขยายเกทร่วมนั้นก็ เช่นเดียวกับวงจรขยายเดรนร่วมและวงจรขยายซอสร่วมเพราะเป็นวงจรขยายแบบแบ่งแรงดันเหมือนกัน ดังนั้น จึงใช้ค่าความต้านทานต่าง ๆ เหมือนกัน ดังนั้น จะไม่ขอกล่าวถึงการออกแบบเพื่อหาความต้านทานต่าง ๆ แต่จะกล่าวถึงการหาค่าอัตราขยายแรงดันของวงจรเกทร่วมดังนี้



รูปที่ 3.6 วงจรขยายเกทร่วมที่ใช้ในการออกแบบ

จากวงจรดังรูป สามารถหาค่าอัตราขยายแรงดัน ได้ดังนี้

$$AV = -gmRD$$

$$= -7.326 \text{ เท่า}$$

### 3.3.3 การออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกระแส

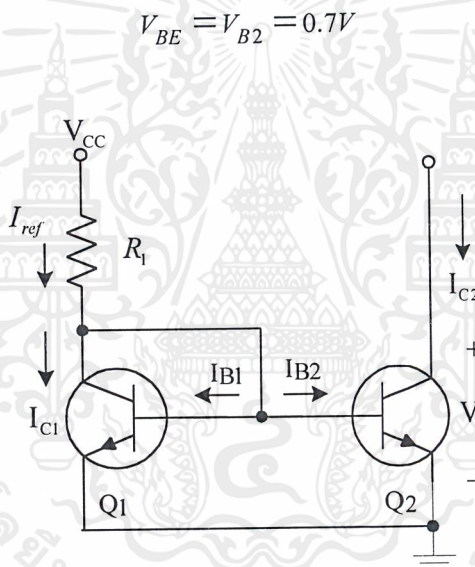
การออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกระแส นั้น จะต้องคำนึงถึงจะนำเอาวงจรแหล่งจ่ายกระแสไหนไปใช้กับงานแบบใด ซึ่งวงจรแหล่งจ่ายกระแสมีอยู่หลายแบบด้วยกัน แต่ละแบบนั้นจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถอ่านรายละเอียดได้ในบทที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนเพื่อหา สำหรับออกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบของแหล่งจ่ายกระแสแต่ละแบบนั้น จะต้องกำหนดค่ากระแสที่ต้องการนำไปใช้งาน ซึ่งใน  
 โครงการชดเชยปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะนี้ได้กำหนดกระแสเอาต์พุตประมาณ 1  
 mA ซึ่งสามารถนำไปใช้กับวงจรอื่นๆ ที่มีอยู่ในโครงการชดเชยนี้ได้ด้วย สำหรับการออกแบบนั้น  
 แสดงไว้ดังต่อไปนี้ เป็นวงจรจริงที่ต้องใช้ในโครงการชดเชยปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่  
 เฉพาะตัว

### 1). วงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์

กำหนดให้กระแส  $I_O = I_{C2} = 1 \text{ mA}$

และ ที่มี  $V_{CC} = +15 \text{ V}$ ,  $\beta = 40 - 100$



รูปที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์

จากรูปจะได้สมการดังนี้

$$I_C = I_{C2} = I_{C1} = \frac{I_{ref}}{\left(1 + \frac{2}{\beta}\right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าได้แล้วจะได้

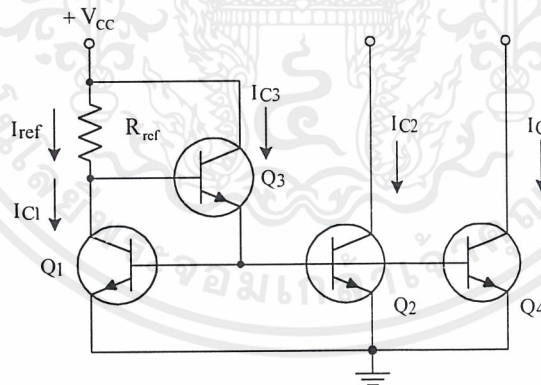
$$1 \text{ mA} = \frac{I_{ref}}{\left(1 + \frac{2}{40}\right)}$$

$$\begin{aligned} I_{ref} &= 1 \text{ mA} \times (1 + 0.05) \\ &= 0.95 \text{ mA} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าความต้านทาน  $R_1$

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_{ref}} \\ &= 15 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

2) แหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่าค่าเอาต์พุต



รูปที่ 3.8 แหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่าค่าเอาต์พุต

กำหนดให้  $I_o = 1 \text{ mA}$

ให้  $V_{CC} = +15\text{V}$ ,  $\beta = 40-100$

และ  $V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE3} = V_{BE4} = 0.7\text{V}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ

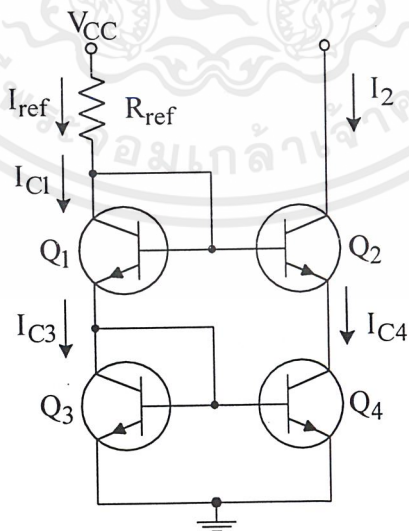
$$I_O = I_{C2} = I_{C4} = \frac{I_{ref}}{1 + 2/(\beta^2 + \beta)}$$

$$\begin{aligned} I_{ref} &= I_O \left( 1 + \frac{2}{(\beta^2 + \beta)} \right) \\ &= 1 \text{ mA} \left( 1 + \frac{2}{(40^2 + 40)} \right) \\ &= 1 \text{ mA} \end{aligned}$$

จากสมการ

$$\begin{aligned} R_{ref} &= \frac{V_{CC} - V_{BE1} - V_{BE3}}{I_{ref}} \\ &= 13.6 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

### 3). แหล่งจ่ายกระแสคอสมิก



รูปที่ 3.9 แหล่งจ่ายกระแสคอสมิกที่ใช้ในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

$$I_O = 1 \text{ mA}$$

ให้  $V_{CC} = +15\text{V}$ ,  $\beta = 40-100$

และ  $V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE3} = V_{BE7} = 0.7\text{V}$

จากรูปเขียนสมการได้ดังนี้

$$I_{ref} = I_{C1} + 2I_B$$

ดังนั้น เมื่อ

$$I_{C1} = I_{ref} / (1 + 2/\beta)$$

$$I_{C3} = I_{ref} / (1 + 2/\beta) = I_{C4}$$

ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$I_{C2} = I_{ref} \cdot \frac{1}{4 \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}$$

เมื่อ  $I_{C2} = 1 \text{ mA}$

จะได้

$$I_{ref} = I_{C2} \left(1 + \frac{4}{\beta}\right) = 1.1 \text{ mA}$$

เมื่อมองจากรูปจะได้สมการ

$$V_{CC} - I_{ref} R_{ref} - V_{BE1} - V_{BE3}$$

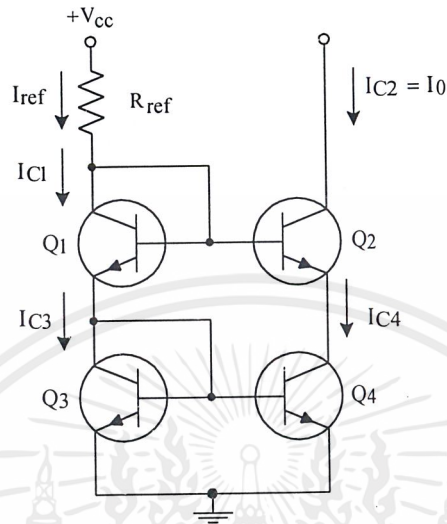
ดังนั้น

$$R_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE1} - V_{BE2}}{I_{ref}}$$

$$= 12.36 \text{ k}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4) วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลัน



รูปที่ 3.10 วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลันที่ใช้ในการออกแบบ

กำหนดให้  $I_O = 1 \text{ mA}$ ,  $V_{CC} = +15\text{V}$ ,  $\beta = 40 - 100$

และ  $V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE3} = V_{BE7} = 0.7 \text{ V}$

จากสมการ

$$I_O = I_{C2} = I_{ref} \left[ \frac{(2 + \beta)\beta}{\beta^2 + 2\beta + 2} + \right]$$

เมื่อค่า  $I_{C2} = 1 \text{ mA}$

$$1 - \left[ \frac{2}{40^2 + 80 + 2} \right]$$

$$= 0.99 \text{ mA}$$

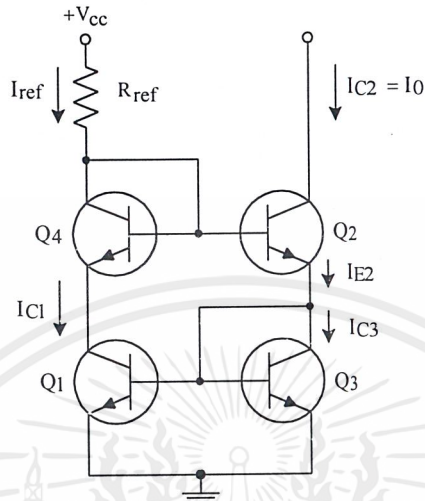
ดังนั้นจากรูปวงจรจะได้

จะได้

$$R_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE1} - V_{BE2}}{I_{ref}} = 13.73 \text{ kHz}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5) วงจรแหล่งจ่ายกระแสหลอดไฟ



รูปที่ 3.11 วงจรแหล่งจ่ายกระแสหลอดไฟ

กำหนดให้  $I_O = 5 \mu\text{A}$  และให้ค่า  $I_{ref}$  ประมาณ 1 mA,  $V_{CC} = +15 \text{ V}$

$$V_{BE1} = V_{BE2} = 0.7, \beta = 40 - 100$$

จากสมการ

$$I_{ref} = \frac{V_{CC} - V_{BE1}}{R1}$$

$$= 14.3 \text{ k}$$

จากรูปสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I_{ref} = I_{C1} + I_{B1} + I_{B2}$$

$$= I_{C1} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) + \frac{I_{C2}}{\beta}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{C1} = \frac{I_{ref} - \frac{I_{C2}}{\beta}}{1 + \frac{1}{\beta}} = 1 \text{ mA}$$

จากสมการ

$$V_{Th} = \left( \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right) = I_{C2} R_2$$

ดังนั้น

$$R_2 = V_{Th} \left( \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \right) / I_{C2}$$

$$= 27.55 \text{ k}$$

### 3.3.4 การออกแบบวงจรขยายผลต่าง

#### 1) การออกแบบวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์

ขั้นตอนการออกแบบวงจรขยายผลต่างมีดังนี้

เลือกทรานซิสเตอร์ที่จะนำมาสร้างวงจรขยายผลต่างซึ่งเลือกเบอร์ 2N3904 กำหนดจุดทำงานของวงจร โดยอาศัยข้อมูลจากคู่มือทรานซิสเตอร์ ซึ่งได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$I_{EE} = 1 \text{ mA}$$

$$V_{CC} = -V_{EE} = 15 \text{ V}$$

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$$

$$\beta_{(\min)} = 100$$

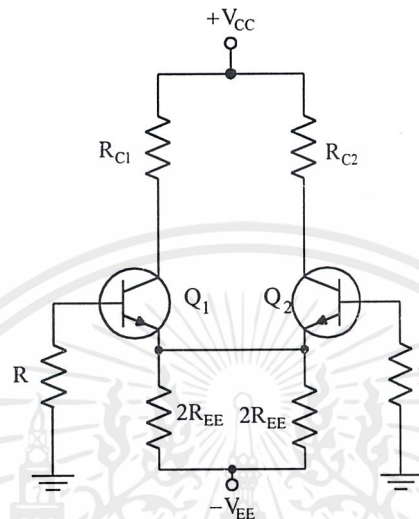
$$V_{CEQ} = \frac{V_{CC}}{2}$$

$$= \frac{15 \text{ V}}{2} = 7.5 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.1) การออกแบบวงจรไบแอสไฟตรง

การออกแบบวงจรไบแอสไฟตรงโดยพิจารณาวงจรดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรขยายผลต่างที่ใช้พิจารณาในการออกแบบ

จากรูปจะได้

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_{EE}}{2} = \frac{1 \text{ mA}}{2} = 0.5 \text{ mA}$$

$$V_{EE} - V_{BE} = I_{E1} \left( 2R_{EE} + \frac{R}{\beta + 1} \right)$$

ให้  $I_{E1} \approx I_{C1} = 0.5 \text{ mA}$

$$2R_{EE} + \frac{R}{\beta + 1} = \frac{14.3}{0.5 \text{ mA}} = 28.6 \text{ k}\Omega$$

ตามปกติแล้ว  $2R_{EE} \gg \frac{R}{\beta + 1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

$$2R_{EE} = 28 \text{ k}\Omega$$

$$R_{EE} = 14 \text{ k}\Omega$$

และ

$$\frac{R}{\beta + 1} = 28.6 \text{ k} - 28 \text{ k} = 600 \text{ }\Omega$$

$$R = 600(\beta + 1) = 600(100 + 1) \approx 60 \text{ k}\Omega$$

คำนวณหาค่าความต้าน  $R_C$

$$R_C = \frac{V_{CC} + V_{EE} - V_{CE} - (I_{EE}R_{EE})}{I_C}$$

$$= 17 \text{ k}\Omega$$

### 1.2) การออกแบบทางด้านผลตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็ก

จาก

$$I_{C1} = I_{C2} = 0.5 \text{ mA}$$

$$g_m = \frac{I_{C1}}{V_T} = 19.23 \text{ mA/V}$$

คำนวณหาอัตราขยายผลรวม

$$A_c = \frac{-g_m R_C}{1 + 2g_m R_{EE} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}$$

$$= -0.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

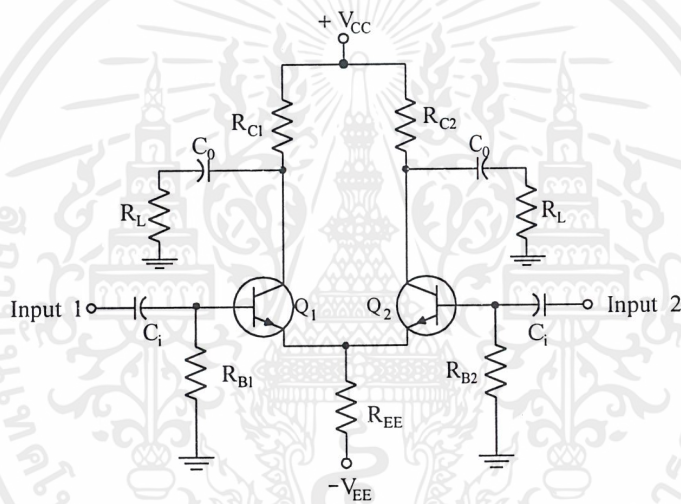
คำนวณหาอัตราขยาย ผลต่าง

$$A_d = -gmR_C = -19.23 \text{ m} \times 17 \text{ k}\Omega$$

ดังนั้น

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{326.91}{0.6} = 544.85$$

จะได้วงจรที่ออกแบบได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ที่ได้จากการออกแบบ

## 2) การออกแบบวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

วงจรขยายผลต่างที่ใช้เจเฟต แสดงดังรูปที่ 3.14 ซึ่งการไบแอสอาจจะใช้ตัวต้านทานหรือแหล่งจ่ายกระแสก็ได้โดยทั่วไปนิยมใช้แหล่งจ่ายกระแส

คุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรง

$$I_{DSS1} = I_{DSS2}$$

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_Q}{2}$$

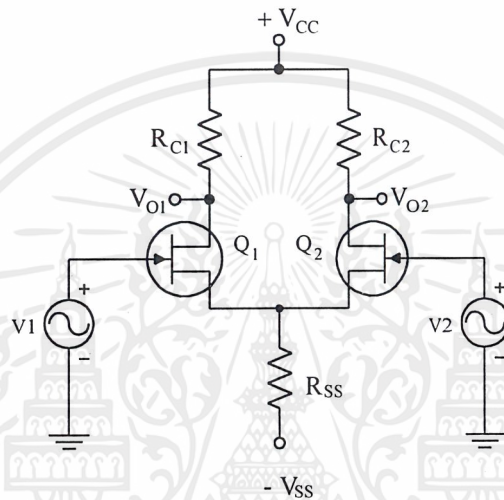
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1) ขั้นตอนการออกแบบวงจรไบแอสทางด้านไฟกระแสตรง

เลือกใช้เจฟต์เบอร์ 1N3819 และกำหนดจุดทำงานของวงจรต่าง ๆ จาก รายละเอียดของ อุปกรณ์ ได้ดังนี้

กำหนด

$$V_{DD} = -V_{SS} = 15 \text{ V}$$



รูปที่ 3.14 วงจรขยายผลต่างที่ใช้เจฟต์

$$I_{DSS} = 20 \text{ mA}$$

$$I_Q = \frac{I_{DSS}}{2} = 10 \text{ mA}$$

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_Q}{2} = 5 \text{ mA}$$

$$V_P = -4 \text{ V}$$

$$V_{DS} = \frac{V_{DD}}{2} = 7.5 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่า  $V_{GS}$

$$V_{GS} = V_P \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right) = -2 \text{ V}$$

คำนวณหาค่า  $R_{SS}$

จาก  $V_{EE} - V_G - V_{GS} - V_{SS} = 0$

เนื่องจาก

$$V_G \approx 0$$

$$V_{SS} = V_{EE} - V_{GS} \\ = 17 \text{ V}$$

ดังนั้น

$$R_{SS} = \frac{V_{SS}}{I_Q} \\ = 1.7 \text{ k}\Omega$$

กำหนด  $R_{G1}$  และ  $R_{G2} = 100 \text{ k}\Omega$

คำนวณหาค่า  $R_{D1}$  และ  $R_{D2}$

$$R_D = \frac{V_{DD} + V_{SS} - V_{DS} - V_{RSS}}{I_D} \\ = 1.1 \text{ K}\Omega$$

## 2.2) การออกแบบทางด้านผลตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็ก

$$gm = -2 \frac{I_{DSS}}{V_P} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) = 5 \text{ mA/V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราขยายผลต่าง

$$A_d = -gmR_D$$

$$A_d = -5.5$$

อัตราขยายผลรวม

$$A_C = \frac{-gmR_D}{1 + 2gmR_{SS}} = 0.3$$

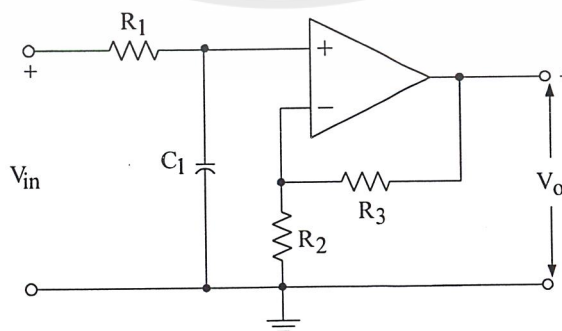
คำนวณค่า CMRR

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_C} \right| = 16.66$$

### 3.3.4 การออกแบบวงจรความถี่

#### 1) วงจรความถี่ต่ำอันดับที่ 1

วงจรความถี่ต่ำอันดับที่ 1 ประกอบด้วยส่วนของการกรองความถี่มีตัวต้านทาน 1 ตัวกับตัวเก็บประจุ 1 ตัว และส่วนของการขยาย จะมีตัวต้านทานสองตัว ทั้งสองส่วนนี้จะต่อเข้ากับออปแอมป์ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรกรองความถี่อันดับ 1 ที่ความถี่ คัดออฟ 10 kHz

กำหนดให้  $f_c = 5 \text{ kHz}$ ,  $f_s = 50 \text{ kHz}$ ,  $b_o = 1$ ,  $k = 2$

การออกแบบ

$$n = \frac{1}{2 \log_{10} \left( \frac{ws}{wc} \right)} \log_{10} \left[ \frac{10-1}{10-1} \right]$$

$$= 0.998 \approx 1$$

คำนวณหาค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ

$$C_1 = \frac{10}{f_c} \mu F = \frac{10}{1 \text{ kHz}} \mu F = 0.01 \mu F$$

$$R_1 = \frac{1}{b_o w_o C_1} = \frac{1}{2\pi \times 1000 \times 0.01 \times 10^{-6}} = 15.9 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \left[ \frac{K}{K-1} \right] R_1 = \left[ \frac{2}{2-1} \right] (15.9 \text{ k}\Omega) = 31.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = K R_1 = 2 \times (15.9 \text{ k}\Omega) = 31.8 \text{ k}\Omega$$

จากการคำนวณให้นำค่าอุปกรณ์ที่คำนวณมาประกอบวงจร พร้อมกับเลือกค่าอุปกรณ์ที่มีอยู่ตามท้องตลาดให้มีค่าใกล้เคียงกับอุปกรณ์ที่คำนวณได้

$$C_1 = 0.001 \mu F \quad \text{ใช้ค่า } 0.001 \mu F$$

$$R_1 = 15.9 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 16 \text{ k}\Omega$$

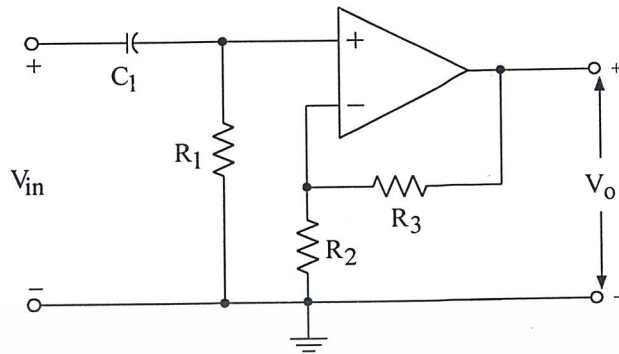
$$R_2 = 19.08 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 19.1 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 95.4 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 95.3 \text{ k}\Omega$$

## 2) วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1

วงจรกรองความถี่อันดับ 1 จะคล้ายกับวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 จะประกอบด้วย ส่วนของการกรองความถี่มีตัวต้านทานหนึ่งตัวกับตัวเก็บประจุหนึ่งตัว และส่วนของการขยาย จะมีตัวต้านทานสองตัวทั้งสองส่วนนี้จะต่อกับออฟแอมป์ดังรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1

การออกแบบวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ตัดออฟ 1kHz

กำหนดให้  $f_c = 1 \text{ kHz}$ ,  $f_s = 100 \text{ Hz}$ ,  $b_o = 1$ ,  $K = 2$

การออกแบบ

$$n = \frac{1}{2 \log_{10} \left( \frac{ws}{wc} \right)} \log_{10} \left[ \frac{10 - 1}{10 - 1} \right]$$

$$= 0.998 \approx 1$$

คำนวณหาค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ

$$C_1 = \frac{10}{f_c} \mu\text{F} = \frac{10}{1\text{kHz}} \mu\text{F} = 0.01 \mu\text{F}$$

$$R_1 = \frac{1}{b_o w_o C_1} = \frac{1}{2 \times 1000 \times 0.01 \times 10^{-6}} = 15.9 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \left[ \frac{K}{K-1} \right] R_1 = \left[ \frac{2}{2-1} \right] (15.9 \text{ k}\Omega) = 31.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = K R_1 = 2(15.9 \text{ k}\Omega) = 31.8 \text{ k}\Omega$$

จากการคำนวณให้นำค่าอุปกรณ์ที่คำนวณมาประกอบวงจร พร้อมกับเลือกค่าอุปกรณ์ที่มี

อยู่ตามท้องตลาดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C1 = 0.01 \mu\text{F} \quad \text{ใช้ค่า} \quad 0.01 \mu\text{F}$$

$$R1 = 15.9 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า} \quad 16 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 31.8 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า} \quad 32 \text{ k}\Omega$$

$$R3 = 31.8 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า} \quad 32 \text{ k}\Omega$$

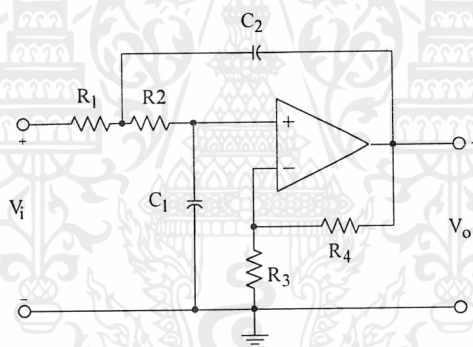
### 3) วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2

วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 วงจรจะมีลักษณะคล้ายกับวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับที่ 1 แต่เพียงมีตัวเก็บประจุ ที่ทำหน้าที่ป้อนกลับต่อระหว่างขา non-inverting กับขา เอาต์พุตและจะมีตัวต้านทานเพิ่มอีก 1 ตัว เพื่อทำการกรองความถี่ต่ำผ่านอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 3.17

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่คัตออฟ 10 kHz

กำหนดให้  $f_c = 10 \text{ kHz}$ ,  $f_s = 100 \text{ kHz}$ ,  $b_o = 1$ ,  $b_i = 414$ ,  $k = 10$

การออกแบบ



รูปที่ 3.17 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2

$$A_{\max} = 10 \log_{10} \left( 1 + \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2n} \right) = 3 \text{ dB} \quad \text{เมื่อ } \omega = \omega_c$$

$$A_{\min} = 10 \log_{10} \left( 1 + \left( \frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2n} \right) = 40 \text{ dB} \quad \text{เมื่อ } \omega = \omega_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ

$$C_1 = C_2 = \frac{10}{fc} \mu F = 1 \text{ nF}$$

$$R_2 = \frac{b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4b_0(2-k)}}{2b_0} = 3.622 \Omega$$

$$R_1 = \frac{1}{b_0 R_2} = 0.276 \Omega$$

$$R_3 = \left[ \frac{k}{k-1} \right] (R_1 + R_2) = 4.33 \Omega$$

$$R_4 = k(R_1 + R_3) = 38.98 \Omega$$

$$kf = \frac{\omega O}{\omega n} = 62.8 \times 10^3$$

$$km = \frac{C}{kf \cdot C_1} = 15.92 \times 10^3$$

ดังนั้น

$$R_1 = R_1 \times km = 0.276 \times (15.92 \times 10^3) = 4.38 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = R_2 \times km = 3.622 \times (15.92 \times 10^3) = 57.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = R_3 \times km = 4.33 \times (15.92 \times 10^3) = 68.9 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = R_4 \times km = 38.98 \times (15.92 \times 10^3) = 620.5 \text{ k}\Omega$$

จากการคำนวณให้นำค่าอุปกรณ์ที่คำนวณมาประกอบวงจร พร้อมกับเลือกค่าอุปกรณ์ที่มีอยู่ตามท้องตลาด ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุปกรณ์ที่คำนวณได้

$$C_1 = 1 \text{ nF} \quad \text{ใช้ค่า } 1 \text{ nF}$$

$$C_2 = 1 \text{ nF} \quad \text{ใช้ค่า } 1 \text{ nF}$$

$$R_1 = 4.38 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 4.32 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 57.6 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 57.6 \text{ k}\Omega$$

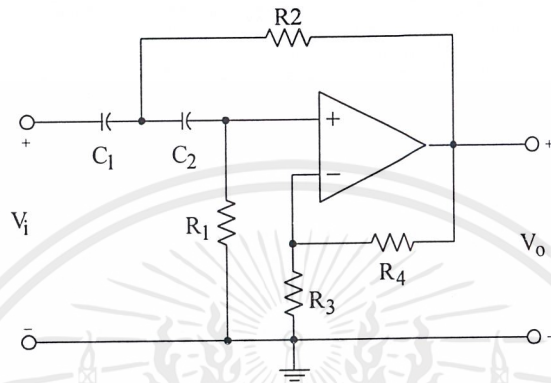
$$R_3 = 68.9 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 71.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 620.5 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 649 \text{ k}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4) วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2

วงจรกรองความถี่สูงอันดับที่สองจะมีลักษณะคล้ายกับวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 เพียงแต่  $R_1$  กับ  $R_2$  และ  $C_1$  กับ  $C_2$  จะสลับที่กัน เพราะทำหน้าที่กรองความถี่สูง ซึ่งแสดงดังรูป



รูปที่ 3.18 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2

การออกแบบวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่คัตออฟ 10 kHz

กำหนดให้  $f_c = 10$  kHz,  $f_s = 1$  kHz,  $b_o = 0.708$ ,  $b_1 = 0.65$ ,  $k = 10$  และ  $Q = 2$

การออกแบบ

$$A_{\max} = 3dB$$

$$A_{\min} = 10 \log_{10} \left( 1 + \left( \cosh n \cosh^{-1} \frac{\omega_c}{\omega_s} \right)^2 \right)$$

$$= 45.9dB$$

$$\Sigma = \left( 10^{A_{\max}/10} - 1 \right)^{0.5}$$

$$= 1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้  $C_1 = C_2 = 1F$ ,  $\omega\omega = 1 \text{ rad/S}$

$$R_2 = \frac{b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4b_0(2-k)}}{2b_0}$$

$$= 3.85 \Omega$$

$$R_1 = \frac{1}{0.708 \times 3.85} = 0.37 \Omega$$

คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ

$$C_1 = \frac{1}{R_1} = 2.702F$$

$$C_2 = \frac{1}{R_2} = 0.26F$$

คำนวณหาค่าความต้านทาน

$$R_1 = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{1} = 1\Omega$$

$$R_2 = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{1} = 1\Omega$$

กำหนดให้  $C = 0.01\mu F$

$$kf = 2\pi \times 10 \times 10^4 = 2\pi \times 10^4$$

$$km = \frac{10^8}{2\pi \times 10^4} = 1.59 \times 10^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ

$$C_1 = \frac{2.702}{\text{kmkf}} = 0.027 \mu F$$

$$C_2 = \frac{0.26}{\text{kmkf}} = 0.0026 \mu F$$

$$R_1 = R_1 \times \text{km} = 1 \times (15.92 \times 10^3) = 1.59 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = R_2 \times \text{km} = 1 \times (15.92 \times 10^3) = 1.59 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = R_3 \times \text{km} = 4.7 \times (15.92 \times 10^3) = 7.47 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = R_4 \times \text{km} = 42.2 \times (15.92 \times 10^3) = 67 \text{ k}\Omega$$

จากการคำนวณให้นำค่าอุปกรณ์ที่คำนวณมาประกอบวงจร พร้อมกับเลือกค่าอุปกรณ์ที่มีอยู่ตามท้องตลาด ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุปกรณ์ที่คำนวณได้

$$C_1 = 0.027 \text{ nF} \quad \text{ใช้ค่า } 0.02 \text{ nF}$$

$$C_2 = 0.0026 \text{ nF} \quad \text{ใช้ค่า } 0.002 \text{ nF}$$

$$R_1 = 1.59 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 1.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 1.5 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 1.6 \text{ k}\Omega$$

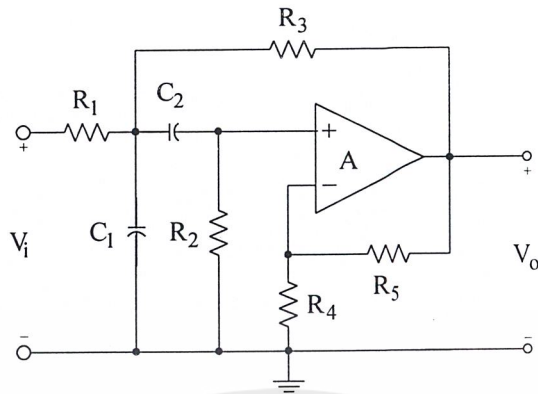
$$R_3 = 7.5 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 7.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 67 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 68 \text{ k}\Omega$$

##### 5) วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่

วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่คือวงจรที่ทำการกรองความถี่เฉพาะความถี่ใดความถี่หนึ่ง ซึ่งเป็นช่วงความถี่เฉพาะ หรือแถบความถี่ จะเป็นช่วงแบนด์วิธ ช่วงใดช่วงหนึ่ง วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ จะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ คือ ส่วนที่กรองความถี่ต่ำและส่วนที่กรองความถี่สูง

เมื่อนำมาประกอบวงจร จะทำให้ความถี่ต่ำกว่าถูกตัด และความถี่ที่สูงกว่าที่กำหนดจะถูกตัด จึงเหลืออยู่เฉพาะแถบความถี่ที่ต้องการเท่านั้น



รูปที่ 3.19 วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่

การออกแบบวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ ที่ความถี่ 1 kHz

กำหนดให้  $f_0 = 1 \text{ kHz}$ ,  $k=2$ ,  $Q=2$ ,  $G=10$

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q} = \frac{1000}{2} = 500 \text{ Hz}$$

$$G_2 = \left\{ \frac{-1 \pm \left( (G-1)^2 + 8Q^2 \right)^{0.5}}{2Q} \right\} = 2.408 \text{ S}$$

$$G_1 = \frac{G}{2Q} = 2.5 \text{ S}$$

$$G_3 = \frac{1}{G_1 + G_2} = 0.204 \text{ S}$$

กำหนดให้  $C_n = C_1 = C_2 =$  และ  $C_0 = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$

$$kf = 2\pi \times 10^3$$

$$km = \frac{C_n}{C_0 k f} = \frac{1}{1 \times 10^{-8} \times 2\pi \times 10^3} = 1.59 \times 10^4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 = 1.59 \times 10^4 \times \frac{1}{2.408} = 6.369 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 1.59 \times 10^4 \times \frac{1}{2.408} = 6.6 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = 1.59 \times 10^4 \times \frac{1}{2.408} = 77.9 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = kR_3 = 2 \times 77.9 \text{ k}\Omega = 115.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = \left( \frac{k}{k-1} \right) R_3 = \left( \frac{2}{2-1} \right) \times 77.9 \text{ k}\Omega = 155.8 \text{ k}\Omega$$

จากการคำนวณให้นำค่าอุปกรณ์ที่คำนวณมาประกอบวงจร พร้อมกับเลือกค่าอุปกรณ์ที่มีอยู่ตามท้องตลาด ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุปกรณ์ที่คำนวณได้

$$C_1 = 0.01 \text{ }\mu\text{F} \quad C_2 = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$$

$$R_1 = 6.369 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 6.49 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 6.6 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 6.8 \text{ k}\Omega$$

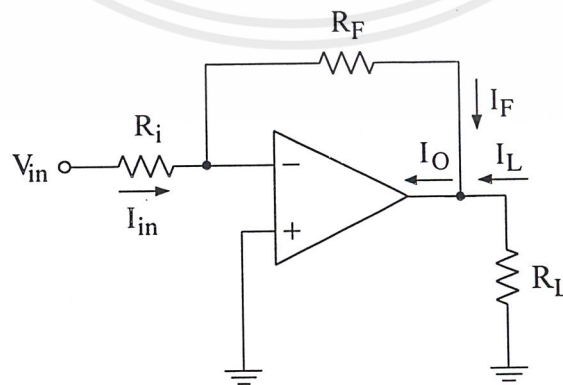
$$R_3 = 77.9 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 76.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 115.8 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 154 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = 155.8 \text{ k}\Omega \quad \text{ใช้ค่า } 154 \text{ k}\Omega$$

#### 6) การออกแบบวงจรขยายชนิดป้อนกลับแบบ กลับเฟส

การออกแบบวงจรขยายออปแอมป์ ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส ขยาย 4 เท่า



รูปที่ 3.20 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบ

กำหนดให้  $V_{in} = 1 \text{ V}$ ,  $R_i = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$

$$\text{คั้งนั้นอัตราขยาย} = \frac{R_F}{R_i}$$

ถ้ากำหนดให้ขยาย 1 เท่า,  $R_i = 100 \text{ k}\Omega$

$$1 \text{ เท่า} = \frac{R_F}{R_i}$$

$$1 \text{ เท่า} = \frac{R_F}{100k}$$

$$1 \times 100k = 100k$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_F}{R_i}$$

$$V_{out} = (1V) \frac{100k}{100k} = 1V$$

จาก

$$I_i = \frac{V_i}{R_i}$$

$$= 10 \mu A$$

$$V_{RF} = I_F R_F$$

$$= 1V$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น เลื่อนเฟส 180 องศา เพราะเป็นแบบกลับเฟส

$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = \frac{1V}{10 \text{ k}\Omega} = 0.1 \text{ mA}$$

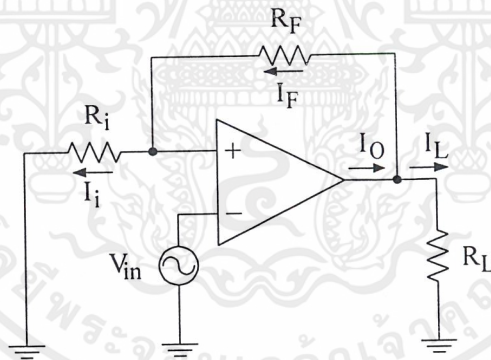
$$I_o = I_F + I_L = 10 \text{ }\mu\text{A} + 100 \text{ }\mu\text{A} = 110 \text{ }\mu\text{A}$$

### 7) การออกแบบวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส

การออกแบบวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสขยาย 2 เท่า  
การออกแบบ

กำหนดให้  $V_{in} = 1 \text{ V}$ ,  $R_i = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$

ดังนั้นอัตราขยาย  $= \frac{R_F}{R_i} + 1$



รูปที่ 3.21 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส

$$2 \text{ เท่า} = \frac{R_F}{100 \text{ k}\Omega} + 1$$

$$R_F = (2 - 1)100 \text{ k}\Omega = 100 \text{ k}\Omega$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_F}{R_i} = 1 \text{ V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{RF} = I_F R_F$$

$$= (10 \mu A)(100 k\Omega)$$

$$V_O = V_{RF} + V_{Ri}$$

$$V_O = 2 V$$

ดังนั้น เลื่อนเฟส 0 องศา เพราะเป็นแบบไม่กลับเฟส

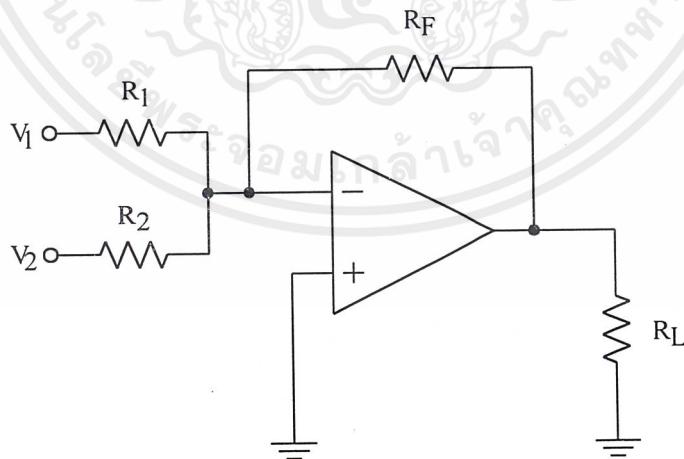
$$I_L = \frac{V_o}{R_L} = 0.1 mA$$

$$I_O = I_L + I_F = 110 \mu A$$

### 8) การออกแบบวงจรผลรวม

กำหนดให้  $V_1 = 1V$ ,  $V_2 = 2 V$ ,  $R_F = 10 k\Omega$

OUTPUT = 10 V



รูปที่ 3.22 วงจรผลรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบ

จาก

$$V_{RF} = I_F R_F$$

$$I_F = \frac{V_{RF}}{R_F}$$

$$= \frac{10V}{100 \text{ k}\Omega}$$

$$= 100 \mu A$$

$$I_F = I_1 + I_2$$

กำหนดให้  $I_1 = I_2 = 50 \mu A$

$$R_1 = \frac{V_1}{I_1}$$

$$= \frac{1V}{10 \mu A}$$

$$= 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{V_2}{I_2}$$

$$= \frac{2V}{90 \mu A}$$

$$= 22.22 \text{ k}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

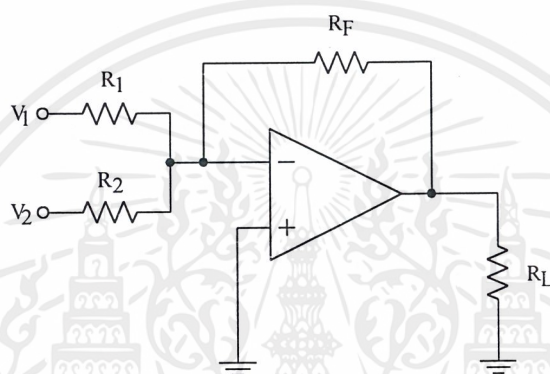
พิจารณาการเลือกอุปกรณ์เพื่อประกอบวงจรในการทดลอง

$$R_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 22.22 \text{ k}\Omega \text{ เลือกใช้ } 22 \text{ k}\Omega$$

### 9) การออกแบบวงจรหาค่าเฉลี่ย

กำหนดให้  $V_1 = 5 \text{ V}$ ,  $V_2 = 3 \text{ V}$



รูปที่ 3.23 วงจรหาค่าเฉลี่ย

การออกแบบ

จาก

$$R_1 = R_2 = R \text{ (etc)}$$

กำหนดให้

$$R = 20 \text{ k}\Omega$$

จาก

$$R_F = \frac{R}{n} \text{ เมื่อ } n = \text{จำนวนอินพุต}$$

$$= 10 \text{ k}\Omega$$

จาก

$$V_o = -\left(\frac{V_1 + V_2}{n}\right) \text{ เมื่อ } n = \text{จำนวนอินพุต}$$

$$V_o = -\left(\frac{5\text{V} + 3\text{V}}{2}\right) = \frac{-8\text{V}}{2} = -4\text{V}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 10) การออกแบบวงจรขยายผลต่าง โดยใช้โอปแอมป์

กำหนดให้  $V_1 = 1\text{ V}$ ,  $V_2 = 2\text{ V}$ ,  $R_1 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{ k}\Omega$

การออกแบบ

ต้องการให้  $V_{O1} = g \cdot V_1 = 1\text{ V}$

$$g = \frac{V_{O1}}{V_1} = \frac{1\text{ V}}{1\text{ V}} = 1$$

$$gR_1 = gR_1 = 1 \times 100\text{ k}\Omega = 100\text{ k}\Omega$$

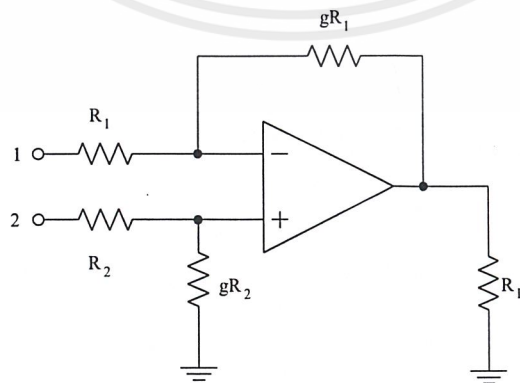
ต้องการให้  $V_{O2} = g \cdot V_2 = 2\text{ V}$

$$g = \frac{V_{O2}}{V_2} = \frac{2\text{ V}}{2\text{ V}} = 1$$

$$gR_2 = gR_2 = 1 \times 100\text{ k}\Omega = 100\text{ k}\Omega$$

ดังนั้น  $V_O = g \cdot V_1 - g \cdot V_2 = 1\text{ V} - 2\text{ V} = -1\text{ V}$

$$A_{DIFF} = g = \frac{gR}{R} = \frac{V_O}{V_1 - V_2} = \frac{-1\text{ V}}{1\text{ V} - 2\text{ V}} = 1$$



รูปที่ 3.24 วงจรขยายผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 กล่าวนำ

ในการทดลองชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว นั้นจะ ต้องใช้อุปกรณ์ประกอบการทดลองต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ชุดปฏิบัติการทดลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว, แผงวงจรทดลอง, ออสซิลโลสโคป, มัลติมิเตอร์ และอุปกรณ์ต่อรวมอื่นๆ ที่จำเป็น โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนของการทดลองชุดปฏิบัติการทดลองโดยการประกอบวงจรจริง และส่วนของการทดลองโดยใช้โปรแกรม Pspice วิเคราะห์การทำงานของแต่ละวงจร ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองดังต่อไปนี้

#### 4.2 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองจะนำเอาโปรแกรม Pspice มาใช้ในการวิเคราะห์วงจรต่างๆ แล้วนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากการประกอบวงจรจริง โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

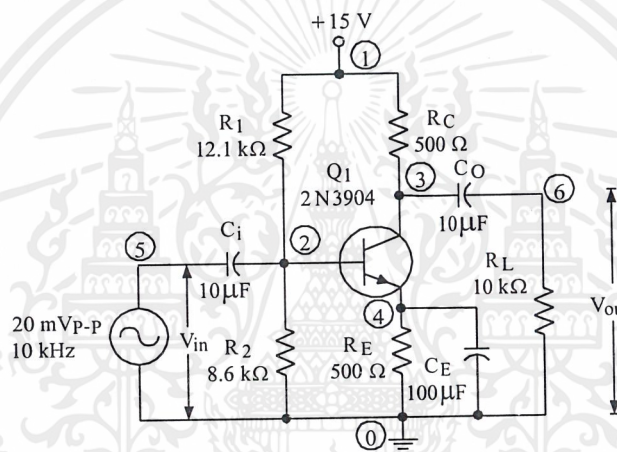
- 1) เมื่อต้องการออกแบบวงจรต่างๆ ขั้นตอนแรก ทำการออกแบบวงจรโดยการคำนวณค่าต่างๆ ของวงจรเสียก่อน
- 2) เมื่อคำนวณค่าอุปกรณ์ และค่าต่างๆ ของวงจรแล้วทำการพิจารณาเลือกค่าอุปกรณ์ที่ใกล้เคียงกับค่าอุปกรณ์ตามท้องตลาดมากที่สุด เพื่อนำมาประกอบวงจรที่ออกแบบไว้
- 3) นำวงจรที่ออกแบบไว้ในข้อ 2 นำมาประกอบวงจรในโปรแกรม Pspice เพื่อตรวจสอบว่าวงจรที่ทำการออกแบบนั้น ทำให้ได้ผลการออกแบบตรงกับการคำนวณหรือไม่ เพื่อแก้ไขต่อไป
- 4) ทำการประกอบวงจรจริงตามการออกแบบ และหลังจากใช้โปรแกรม Pspice แล้ว เพื่อใช้ออสซิลโลสโคป และมัลติมิเตอร์ วัดค่าต่างๆ ของวงจร
- 5) ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบโดยโปรแกรม Pspice กับผลการทดลองที่ได้จากการวัดจากออสซิลโลสโคป และมัลติมิเตอร์

### 4.3 การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Pspice และผลการทดลองที่ได้จากการประกอบวงจรจริง โดยวงจรที่ใช้ในการทดลองมีดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

ลักษณะของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

#### 1) การทดลองวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice

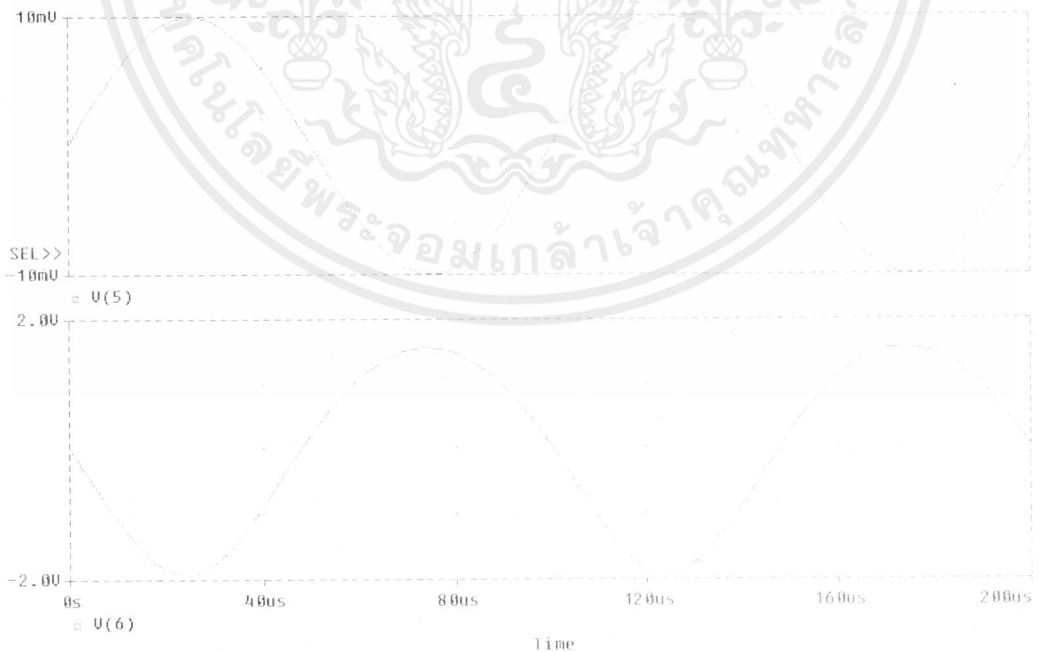
ผลการวิเคราะห์วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมแสดงดังรูปที่ 4.2, รูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4

```
VCC      1 0  DC +15V
Vin      5 0  AC 10mV SIN(0 10mV 10kHz 00)
R1       1 2  12.1k
R2       2 0  8.6k
RC       1 3  500
RE       4 0  500
RL       6 0  10k
Ci       5 2  10uF
Co       3 6  10uF
CE       4 0  100uF
Q1       3 2 4  Q2N3904 ; C B E
.MODEL  Q2N3904 NPN (Is=6.734E-15 BF=100 RB=10)
.AC      DEC 50 1 10G
.OP
.PROBE
.TRAN   1uS 0.2mS
.END
```

```

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION  TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE
(1)    15.0000 (2)    5.7334  (3)    10.0420 (4)    5.0077
(5)    0.0000 (6)    0.0000
**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS
NAME      Q1
MODEL     Q2N3904
IB        9.92E-05
IC        9.92E-03
VBE       7.26E-01
VBC       -4.31E+00
VCE       5.03E+00
BETADC    1.00E+02
GM        3.83E-01
RPI       2.61E+02
RX        1.00E+01
RO        1.00E+12
CBE       0.00E+00
CBC       0.00E+00
CJS       0.00E+00
BETAAC    1.00E+02
CBX       0.00E+00
FT        6.10E+18
    
```

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม



รูปที่ 4.3 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย

โปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม โดยใช้โปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมโดยการประกอบวงจร

2.1) ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.1 ยังไม่ต้องป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรวัดหาคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรงโดยใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลองดังนี้

$$V_{CC} = 15 \text{ V}$$

$$V_{BE} = 0.726 \text{ V}$$

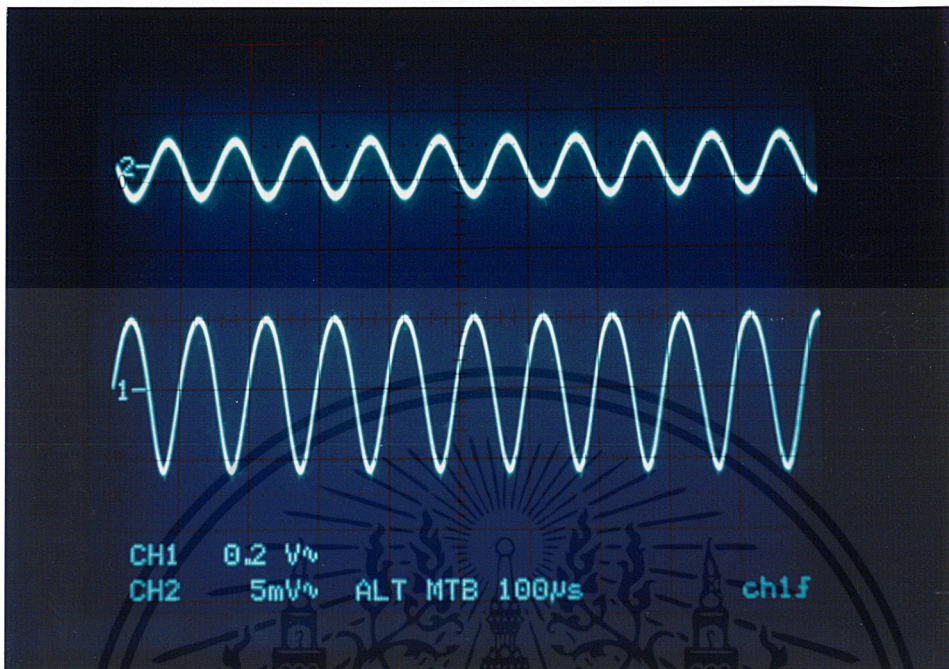
$$V_{CEQ} = 4.62 \text{ V}$$

$$I_B = 0.07 \text{ mA}$$

$$I_C = 10.8 \text{ mA}$$

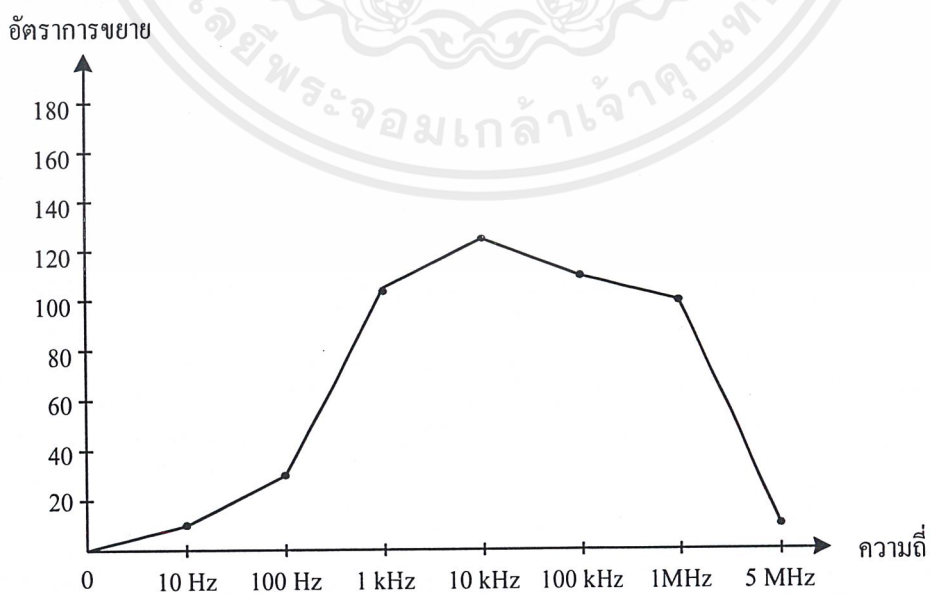
$$\beta = 154$$

2.2) ป้อนสัญญาณอินพุตรูปคลื่นซายน์ขนาด  $20 \text{ mV}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ให้กับวงจรในรูปที่ 4.1 ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

2.3) หาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรโดยการป้อนอินพุตรูปคลื่นไซน์ขนาด  $20 \text{ mV}_{p-p}$  แล้วหาอัตราขยายของวงจรที่ความถี่ต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

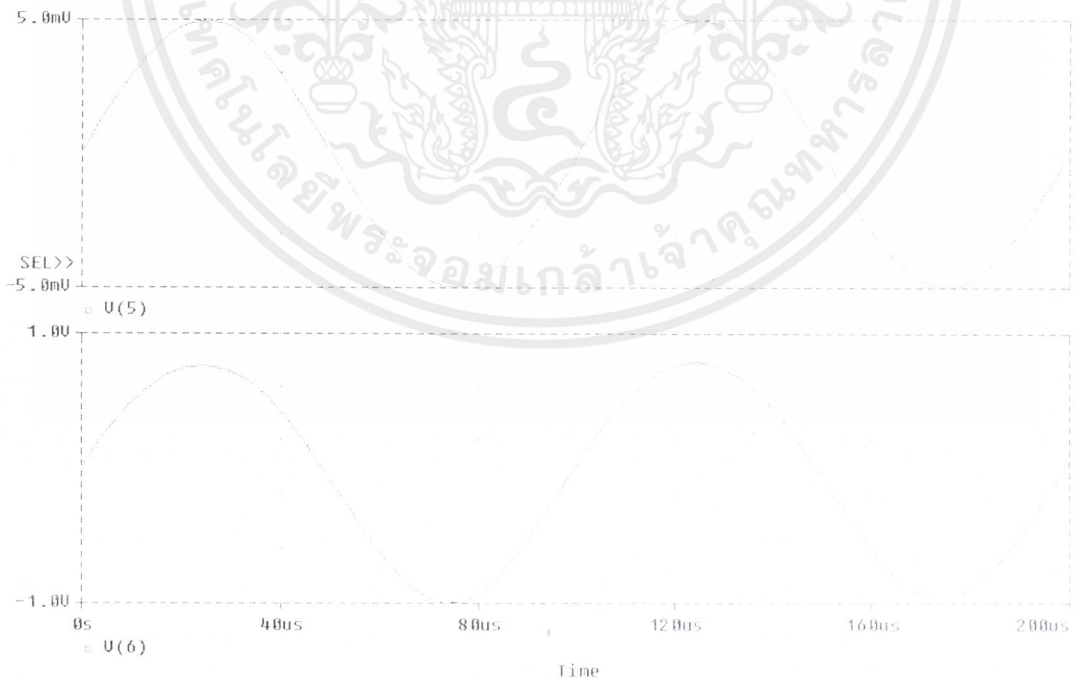
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS
NAME          Q1
MODEL         Q2N3904
IB            9.92E-05
IC            9.92E-03
VBE           7.26E-01
VBC           -4.31E+00
VCE           5.03E+00
BETADC        1.00E+02
GM            3.83E-01
RPI           2.61E+02
RX            1.00E+01
RO            1.00E+12
CBE           0.00E+00
CBC           0.00E+00
CJS           0.00E+00
BETAAC        1.00E+02
CBX           0.00E+00
FT            6.10E+18

```

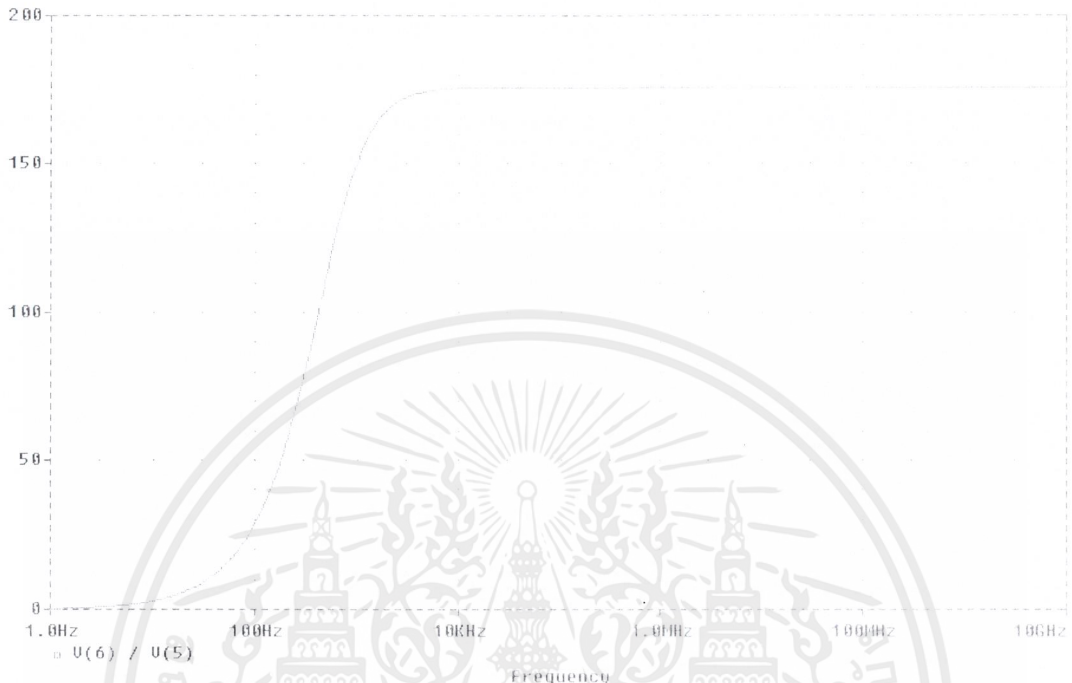
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายเบสร่วม



รูปที่ 4.9 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายเบสร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย

#### โปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเบสร่วม โดยใช้โปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจรขยายเบสร่วมโดยการประกอบวงจร

2.1) ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.7 ยังไม่ต้องป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรวัดหาคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรง โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลองดังนี้

$$V_{CC} = 15 \text{ V}$$

$$V_{BE} = 0.726 \text{ V}$$

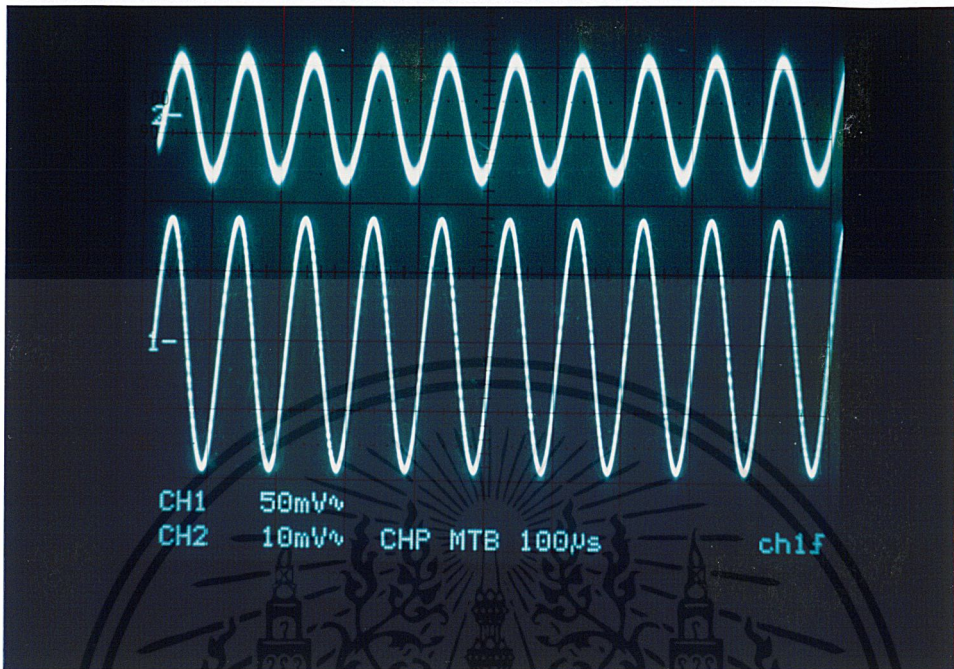
$$V_{CEQ} = 4.62 \text{ V}$$

$$I_B = 0.07 \text{ mA}$$

$$I_C = 10.8 \text{ mA}$$

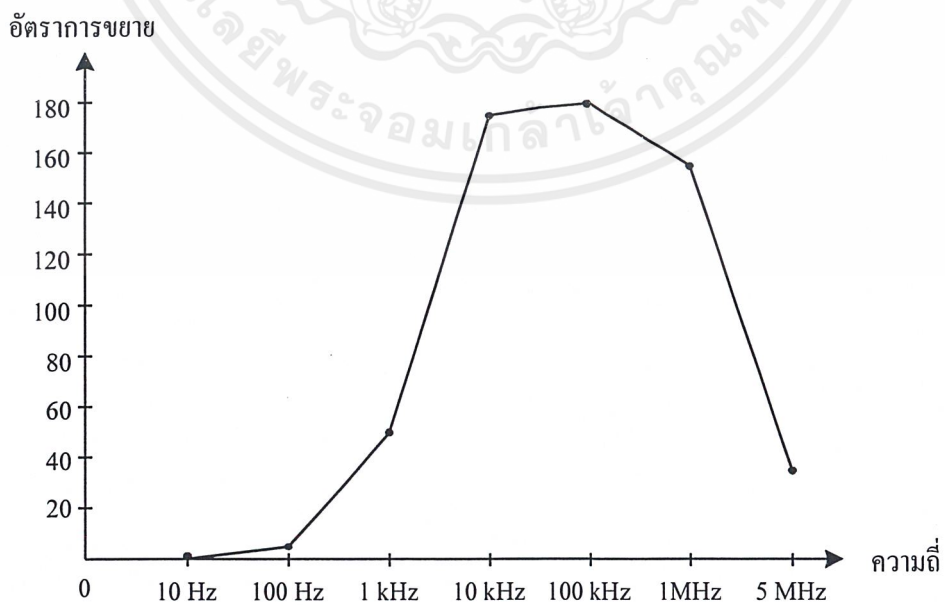
$$\beta = 154$$

2.2) ป้อนสัญญาณอินพุตรูปคลื่นซายน์ขนาด  $10 \text{ mV}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ให้กับวงจรในรูปที่ 4.6 ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายเบสรวม

2.3) หาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร โดยทำการป้อนอินพุตรูปคลื่นไซน์ขนาด 10 mV<sub>p-p</sub> แล้วหาอัตราขยายของวงจรที่ความถี่ต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12

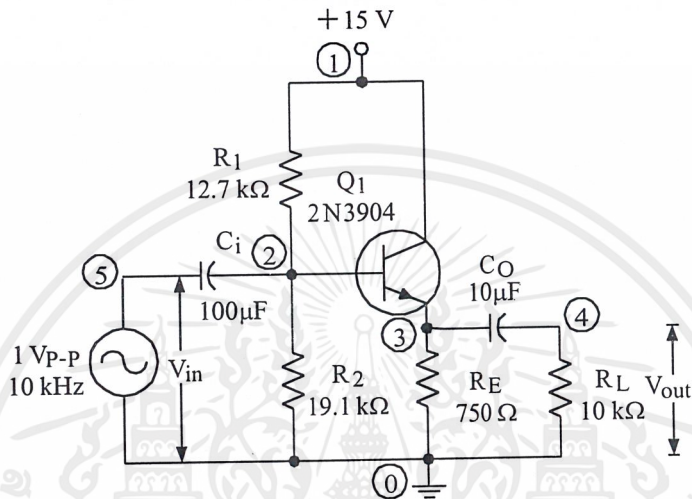


รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเบสรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.3 วงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม

ลักษณะของวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วมที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 วงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม

#### 1) การทดลองวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice

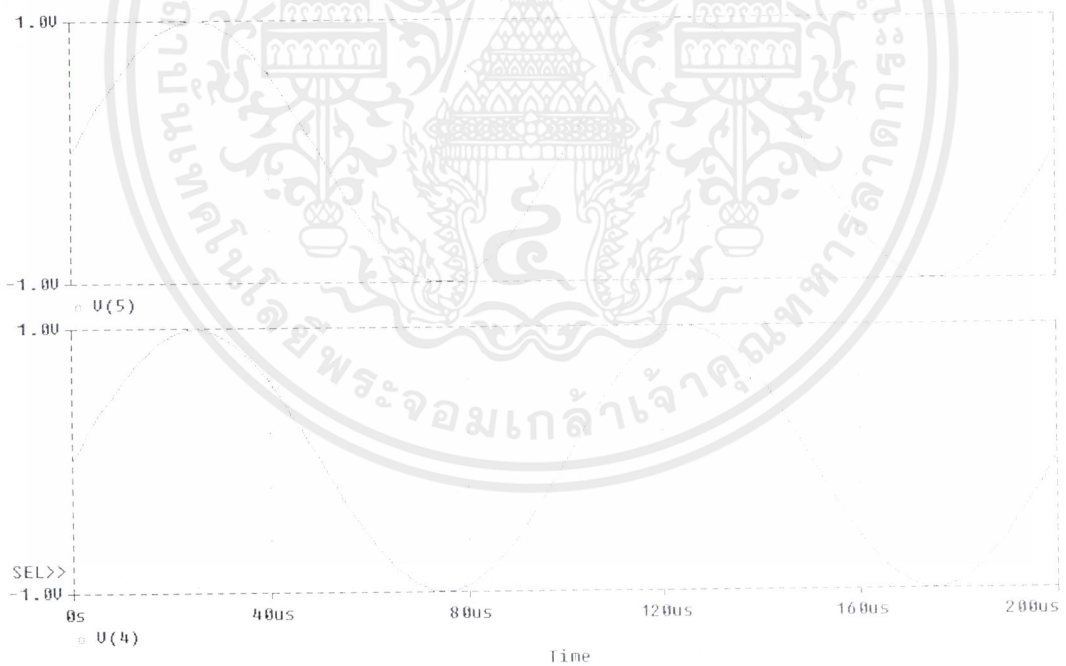
ผลการวิเคราะห์วงจรแสดงดังรูปที่ 4.14 รูปที่ 4.15 และ รูปที่ 4.16

```
VCC      1 0  DC +15V
Vin      5 0  AC 1V SIN(0 1V 10kHz 00)
R1       1 2  12.7k
R2       2 0  19.1k
RE       3 0  750
RL       4 0  10k
Ci       5 2  10uF
Co       3 4  10uF
Q1       1 2 3  Q2N3904 ; C B E
.MODEL  Q2N3904 NPN (Is=6.734E-15 BF=100 RB=10)
.AC DEC 50 1 1G
.OP
.PROBE
.TRAN 1uS 0.2mS
.END
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE    VOLTAGE  NODE    VOLTAGE  NODE    VOLTAGE  NODE    VOLTAGE
(1)     15.0000 (2)     8.2516  (3)     7.5259  (4)     0.0000
(5)     0.0000
**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS
NAME    Q1
MODEL  Q2N3904
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IB	9.94E-05
IC	9.94E-03
VBE	7.26E-01
VBC	-6.75E+00
VCE	7.47E+00
BETADC	1.00E+02
GM	3.84E-01
RPI	2.60E+02
RX	1.00E+01
RO	1.00E+12
CBE	0.00E+00
CBC	0.00E+00
CJS	0.00E+00
BETAAC	1.00E+02
CBX	0.00E+00
FT	-6.11E+18

รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรถยายคอลเลคเตอร์ร่วม



รูปที่ 4.15 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายคอลเลคเตอร์ร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วมโดยการประกอบวงจร

2.1) ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.13 ยังไม่ต้องป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรแล้ววัดหาคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรง โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลองดังนี้

$$V_{CC} = 15 \text{ V}$$

$$V_{BE} = 0.66 \text{ V}$$

$$V_{CEQ} = 6.92 \text{ V}$$

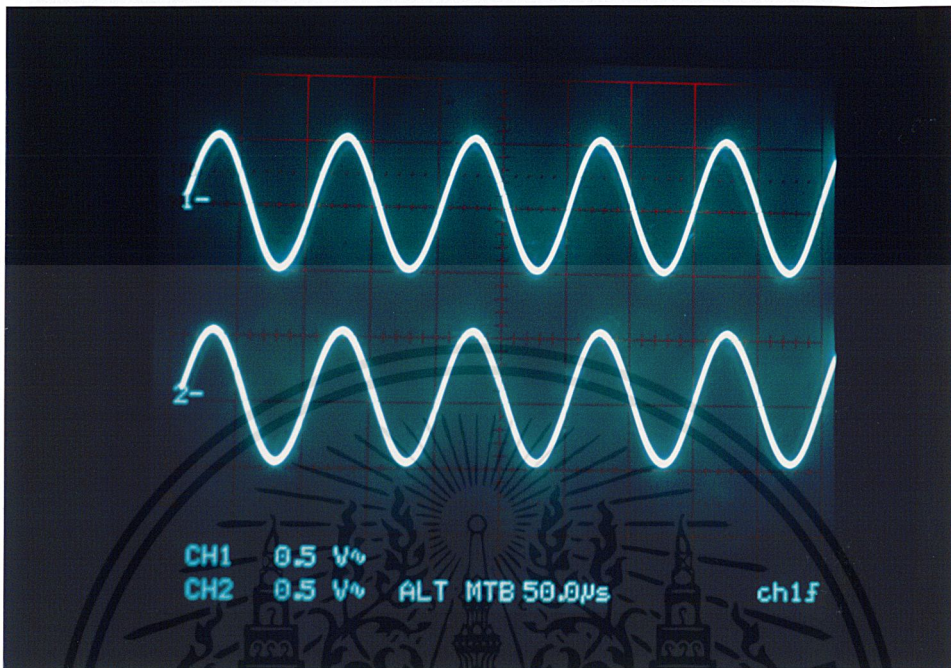
$$I_B = 0.04 \text{ mA}$$

$$I_C = 11.2 \text{ mA}$$

$$\beta = 280$$

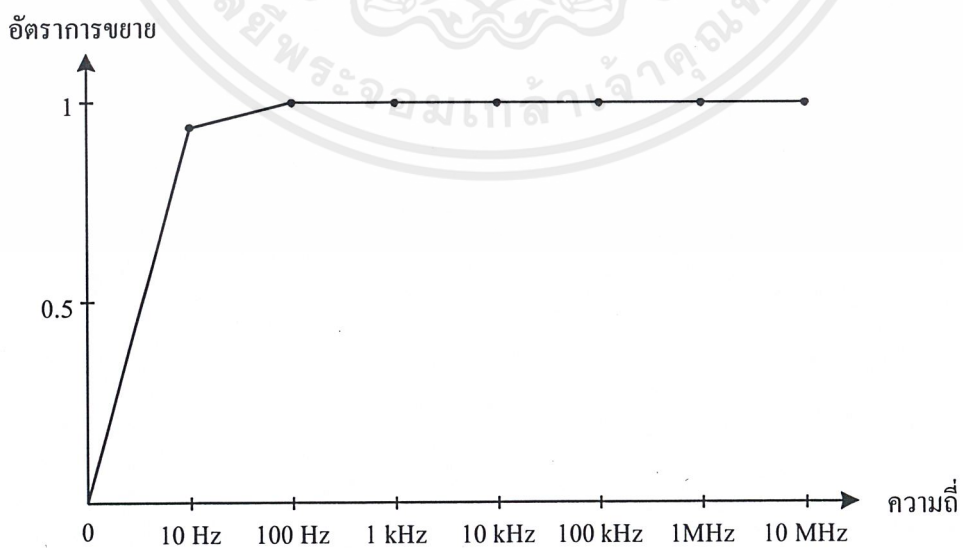
ป้อนสัญญาณอินพุตรูปคลื่นซายน์ขนาด  $1 \text{ V}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ให้กับวงจรรูปที่ 4.13 ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม

2.3) หาผลตอบการสนองทางความถี่ของวงจรโดยทำการป้อนอินพุตรูปคลื่นไซน์ขนาด  $1\text{ V}_{\text{P-P}}$  แล้วหาอัตราขยายของวงจรที่ความถี่ต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18

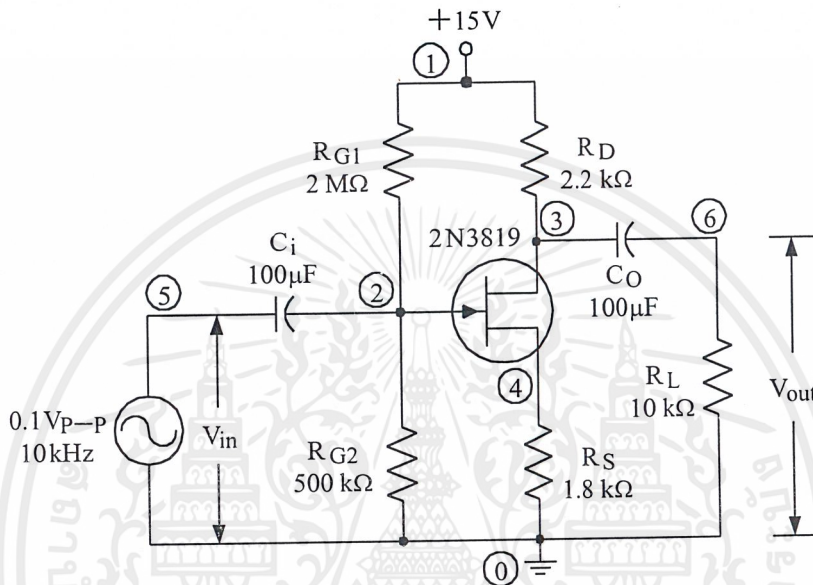


รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายคอลเลคเตอร์ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 วงจรขยายข้อสร่วม

ลักษณะของวงจรขยายข้อสร่วมที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 วงจรขยายข้อสร่วม

##### 1) การทดลองวงจรขยายข้อสร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์วงจรแสดงดังรูปที่ 4.20, รูปที่ 2.21 และรูปที่ 4.22

```
VCC      1 0  DC +15V
Vin      5 0  AC 0.1V SIN(0 0.1V 10kHz 00)
RG1     1 2  2MEG
RG2     2 0  500k
RD      1 3  2.2k
RS      4 0  1.8k
RL      6 0  10k
Ci      5 2  10uF
Co      3 6  10uF
CS      4 0  100uF
J1      3 2 4  FET ;D G S
.MODEL  FET NJF (BETA=1.11m VTO=-3)
.AC DEC 50 1 1G
.OP
.PROBE
.TRAN 1uS 0.2mS
.END
```

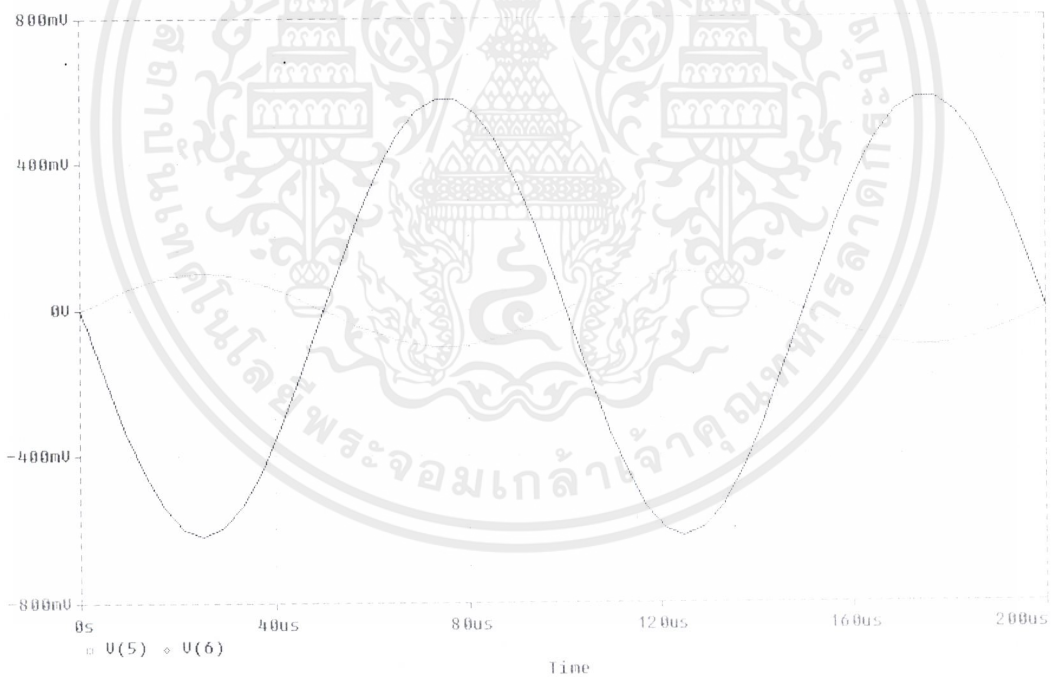
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE   VOLTAGE  NODE   VOLTAGE  NODE   VOLTAGE  NODE   VOLTAGE
(1)    15.0000 (2)    3.0000  (3)    9.5008  (4)    4.4994
(5)    0.0000  (6)    0.0000
**** JFETS
NAME    J1
MODEL  FET
ID      2.50E-03
VGS     -1.50E+00
VDS     5.00E+00
GM      3.33E-03
GDS     0.00E+00
CGS     0.00E+00
CGD     0.00E+00

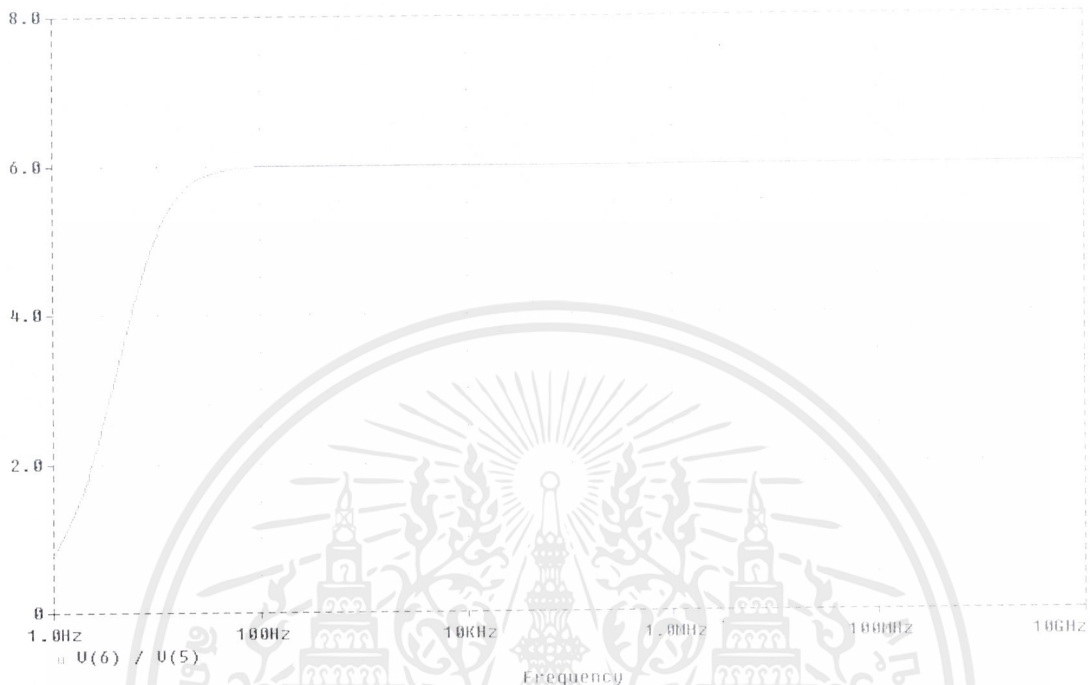
```

รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายซอสร่วม



รูปที่ 4.21 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายซอสร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายชอสร่วม  
โดยใช้โปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจรขยายชอสร่วมโดยการประกอบวงจร

2.1) ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.19 ยังไม่ต้องป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรจากนั้นวัดหาคูณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรง โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลองดังนี้

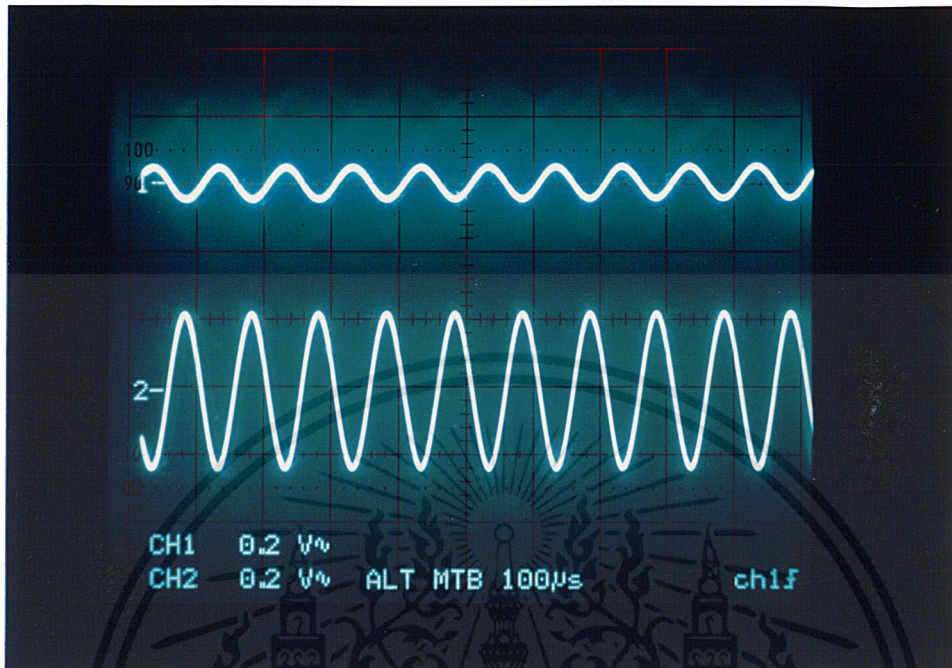
$$V_{DD} = 15 \text{ V}$$

$$V_{GS} = -1.721 \text{ V}$$

$$I_p = 2.74 \text{ mA}$$

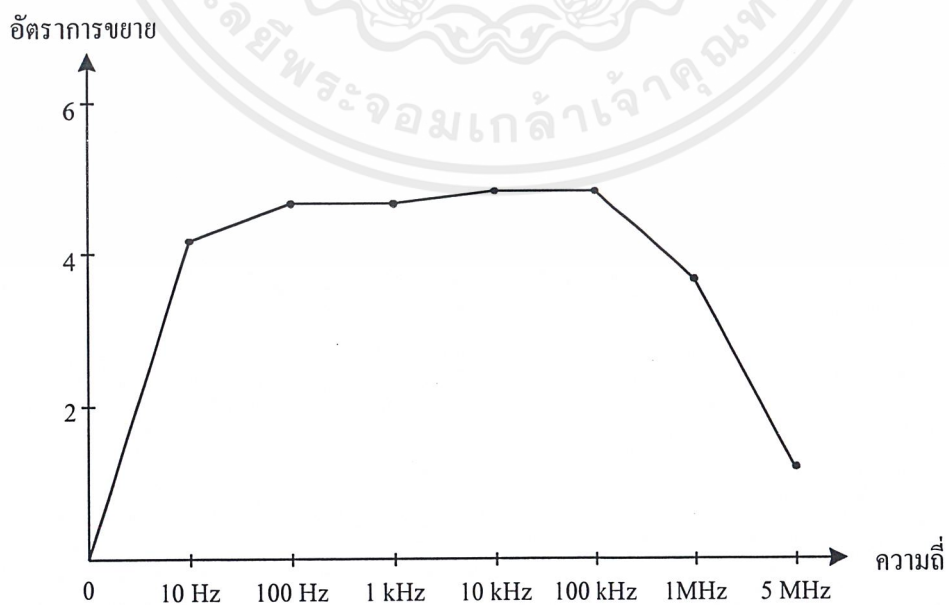
2.2) ป้อนสัญญาณอินพุตรูปคลื่นซายน์ขนาด  $0.1 \text{ mV}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ให้กับวงจรใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายซอสร่วม

2.3) หาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจร โดยทำการป้อนอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $0.1 \text{ mV}_{\text{p-p}}$  แล้วหาอัตราขยายของวงจรที่ความถี่ต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.24

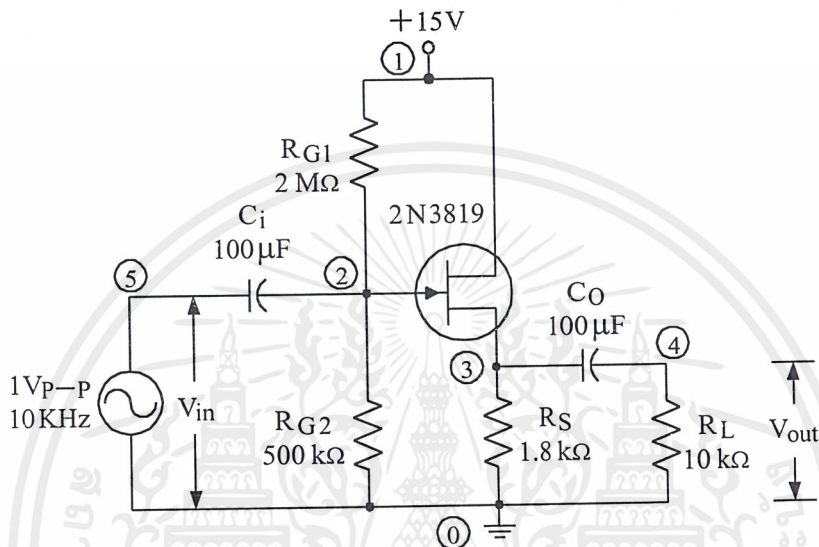


รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายซอสร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.5 วงจรขยายเดรนร่วม

ลักษณะของวงจรขยายเดรนร่วมที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 วงจรขยายเดรนร่วม

#### 1) การทดลองวงจรขยายเดรนร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์ห้วงจรแสดงดังรูปที่ 4.26 รูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28

```
VCC      1 0  DC +15V
Vin      5 0  AC 1V SIN(0 1V 10kHz 00)
RG1      1 2  2MEG
RG2      2 0  500k
RS       3 0  1.8K
RL       4 0  10k
Ci       5 2  10uF
Co       3 4  10uF
J1       1 2 3  FET          ;D G S
.MODEL  FET  NJF (BETA=1.11m VTO=-3)
.AC DEC 50 1 10G
.OP
.PROBE
.TRAN 1uS 0.2mS
.END
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE   VOLTAGE  NODE   VOLTAGE  NODE   VOLTAGE  NODE   VOLTAGE
(1)    15.0000 (2)    3.0000 (3)    4.4994 (4)    0.0000
(5)    0.0000
```

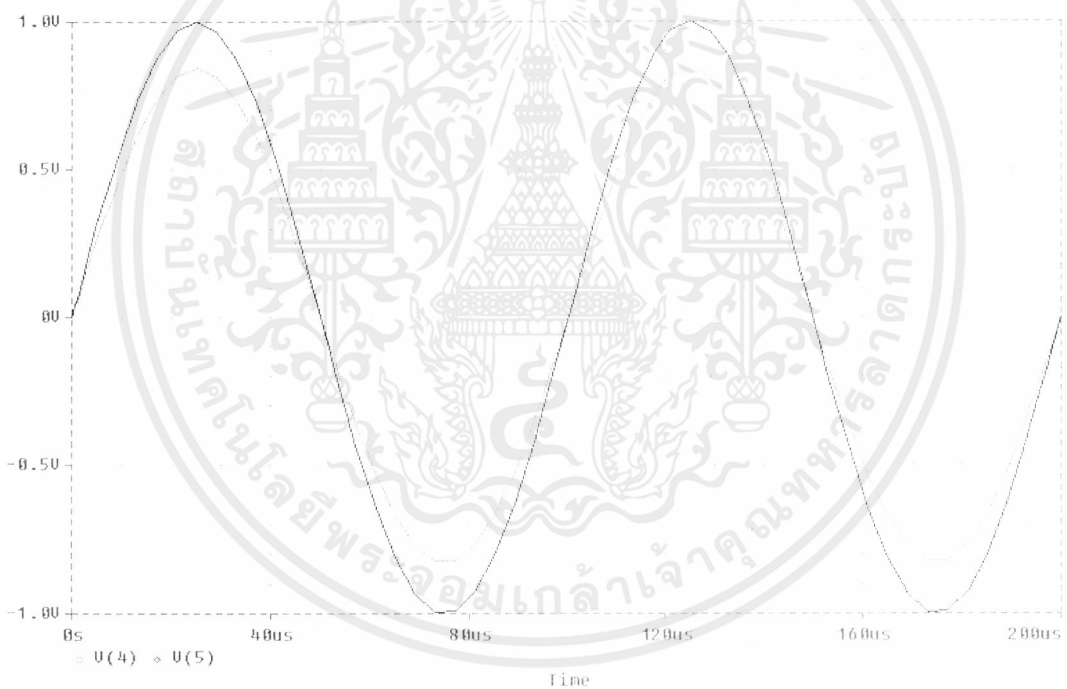
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

**** JFETS
NAME      J1
MODEL     FET
ID        2.50E-03
VGS       -1.50E+00
VDS       1.05E+01
GM        3.33E-03
GDS       0.00E+00
CGS       0.00E+00

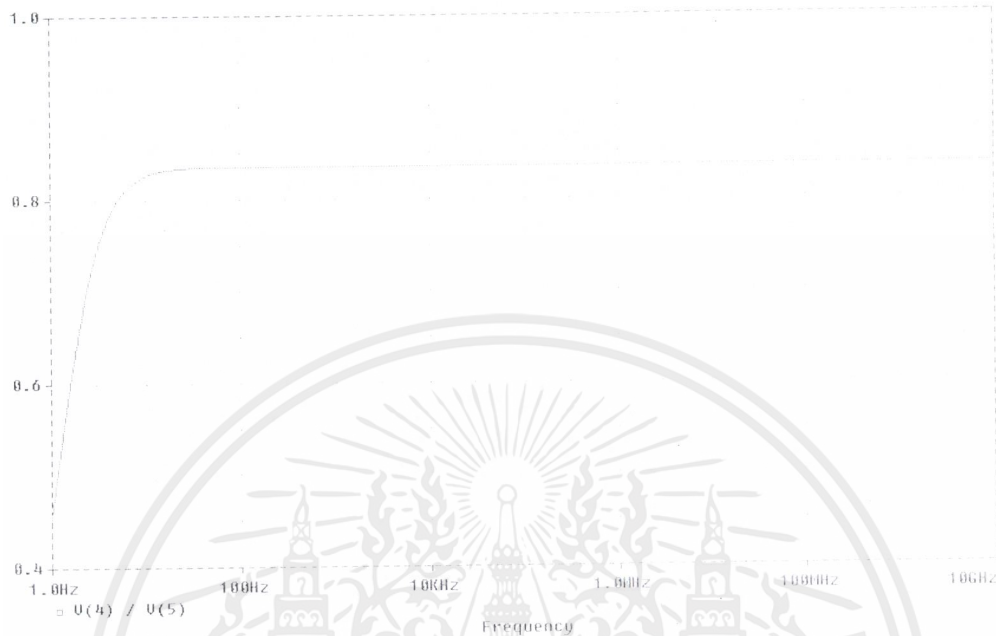
```

รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ทางค่านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรถยายเดรนร่วม



รูปที่ 4.27 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายเดรนร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเดรนร่วม  
โดยใช้โปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจรขยายเดรนร่วมโดยการประกอบวงจร

2.1) ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.25 ยังไม่ต้องทำการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรวัดหาคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรง โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลองดังนี้

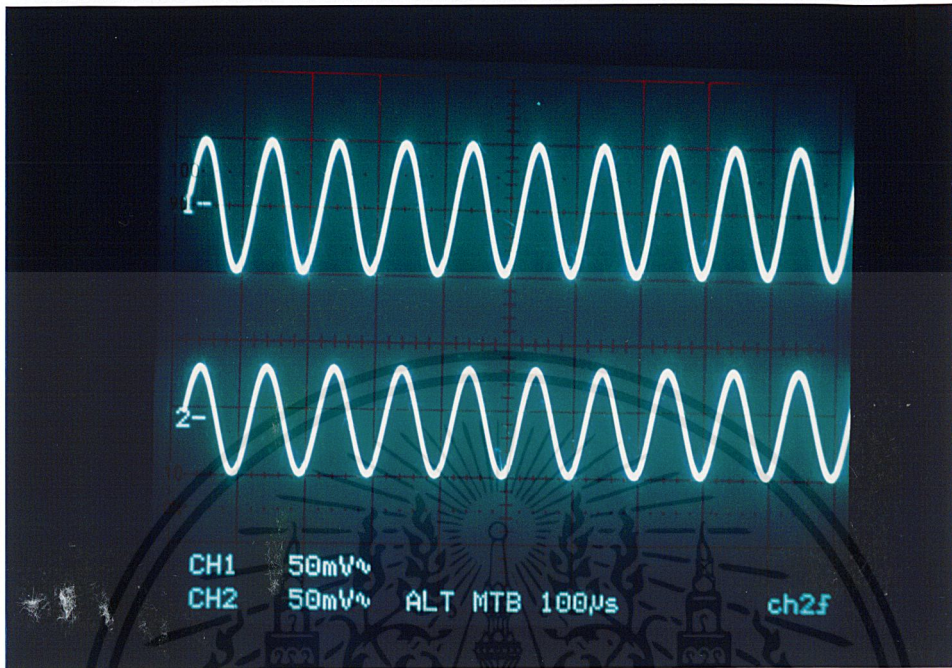
$$V_{DD} = 15 \text{ V}$$

$$V_{GS} = -1.721 \text{ V}$$

$$I_D = 2.74 \text{ mA}$$

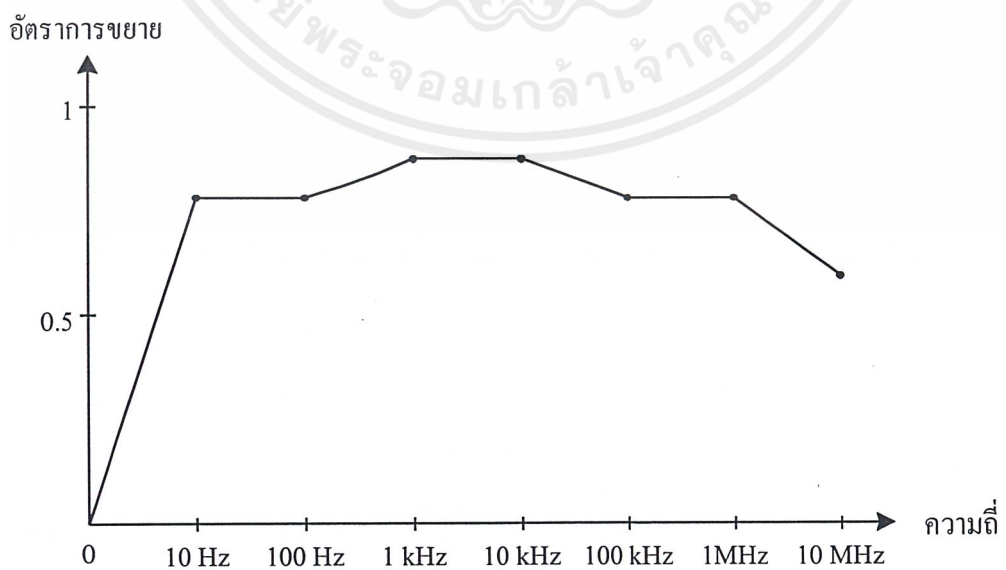
2.2) ป้อนสัญญาณอินพุตรูปคลื่นไซน์ขนาด  $1 \text{ V}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ให้กับวงจรรูปที่ 4.25 ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายเดครนร่วม

2.3) หาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรโดยทำการป้อนอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $1 V_{p-p}$  แล้วหาอัตราขยายของวงจรที่ความถี่ต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.30

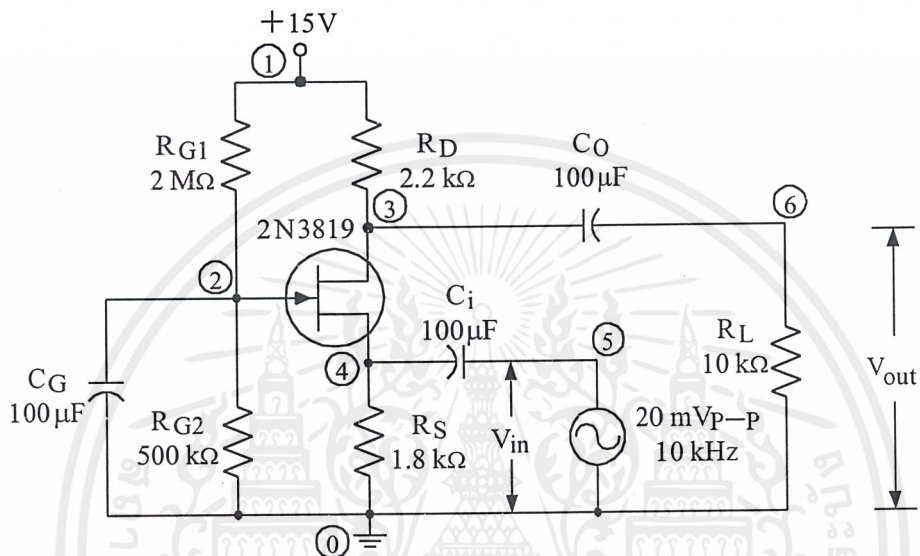


รูปที่ 4.30 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเดครนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.6 วงจรขยายเกทร่วม

ลักษณะของวงจรขยายเกทร่วมที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 วงจรขยายเกทร่วม

#### 1) การทดลองวงจรขยายเกทร่วมโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์วงจรแสดงดังรูปที่ 4.32 รูปที่ 4.33 และรูปที่ 4.34

```
VCC      1 0  DC +15V
Vin      5 0  AC 0.1V SIN(0 0.1V 10kHz' 00)
RG1      1 2  2MEG
RG2      2 0  500k
RD       1 3  2.2k
RS       4 0  1.8K
RL       6 0  10k
Ci       5 4  100uF
Co       3 6  10uF
CG       2 0  100uF
J1       3 2 4  FET ;D G S
.MODEL  FET  NJF (BETA=1.11m VTO=-3)
.AC DEC 50 1 10G
.OP
.PROBE
.TRAN 1uS 0.2mS
.END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE   VOLTAGE  NODE   VOLTAGE  NODE   VOLTAGE  NODE   VOLTAGE
(1)    15.0000 (2)    3.0000  (3)    9.5008  (4)    4.4994
(5)    0.0000  (6)    0.0000
**** JFETS
NAME    J1
MODEL   FET
ID       2.50E-03
VGS     -1.50E+00
VDS     5.00E+00
GM       3.33E-03
GDS     0.00E+00
CGS     0.00E+00

```

รูปที่ 4.32 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายเกทร่วม



รูปที่ 4.33 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายเกทร่วมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรขยายเกทร่วม  
โดยใช้โปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจรรขยายเดรนร่วมโดยการประกอบวงจรจริง

2.1) ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.31 ยังไม่ต้องทำการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรวัดหาคูณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรง โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลองดังนี้

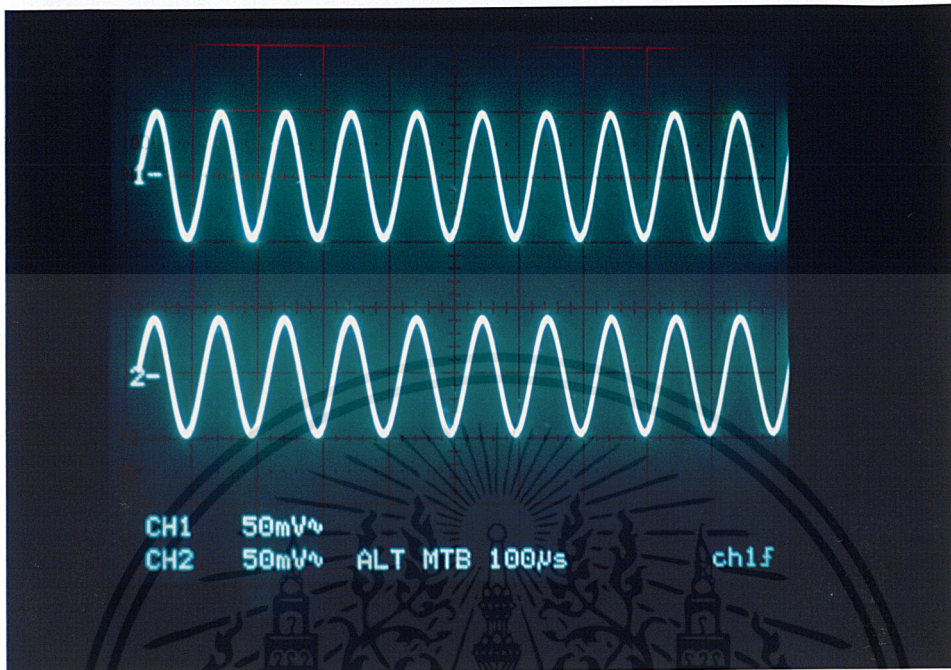
$$V_{DD} = 15 \text{ V}$$

$$V_{GS} = -1.721 \text{ V}$$

$$I_D = 2.74 \text{ mA}$$

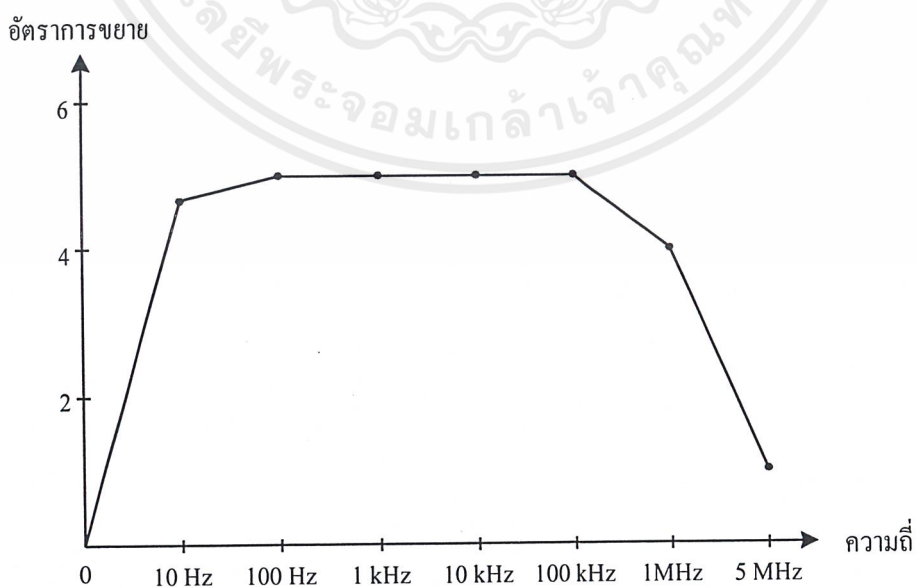
2.2) ป้อนสัญญาณอินพุตรูปคลื่นไซน์ขนาด  $0.1 \text{ V}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ให้กับวงจรใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณทางด้านเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายเกทร่วม

2.3) หาผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรโดยทำการป้อนอินพุตรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $0.1 V_{p-p}$  แล้วหาอัตราขยายของวงจรที่ความถี่ต่างๆ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.36

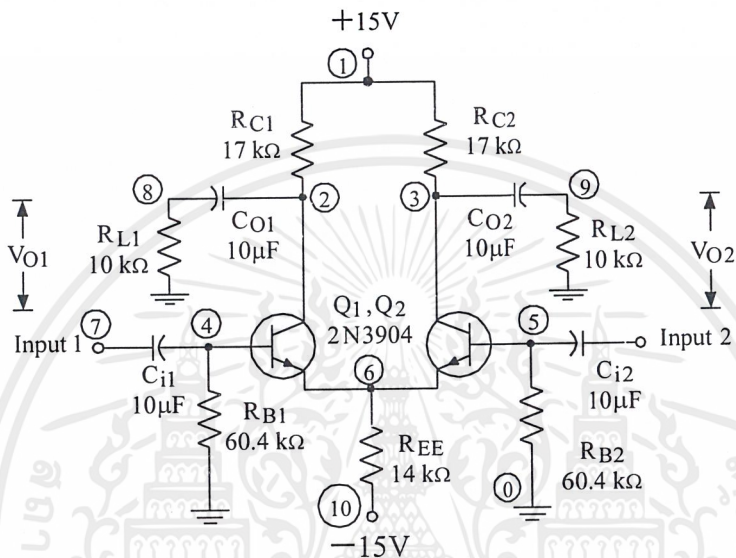


รูปที่ 4.36 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายเกทร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.7 การทดลองวงจรขยายผลต่าง

ลักษณะของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์

#### 1) การทดลองวงจขยายผลต่างโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์วงจรแสดงดังรูปที่ 4.38 รูปที่ 4.39 และรูปที่ 4.40

```

VCC      1  0  DC +15Volt
VEE      10 0  DC -15Volt
Vin      7  0  SIN(0 10mV 10kHz 00)
RC1      1  2  17k
RC2      1  3  17k
RB1      4  0  60.4k
RB2      5  0  60.4k
RL1      9  0  1.5k
RL2      8  0  1.5k
REE      6  10 14k
Ci1      7  4  10uF
Ci2      5  0  10uF
Co1      2  9  10uF
Co2      3  8  10uF
Q1       2  4  6 Q2N3904 ; C B E
Q2       3  5  6 Q2N3904 ; C B E
.MODEL   Q2N3904 NPN (IS=6.734E-15 BF=100 RB=10)
.OP
.PROBE
.TRAN 1uS 0.2mS
.END

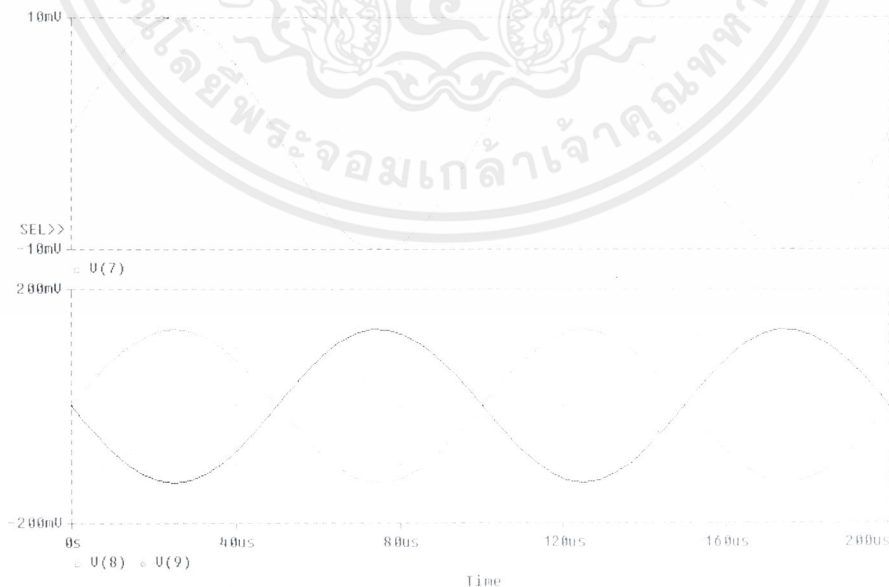
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE   VOLTAGE   NODE   VOLTAGE   NODE   VOLTAGE   NODE   VOLTAGE
(1)    15.0000  (2)    6.5526  (3)    6.5526  (4)    .3001
(5)    .3001    (6)    .9474   (7)    0.0000  (8)    0.0000
(9)    0.0000  (10)   -15.0000
**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS
NAME      Q1          Q2
MODEL     Q2N3904    Q2N3904
IB        4.97E-06  4.97E-06
IC        4.97E-04  4.97E-04
VBE       6.47E-01  6.47E-01
VBC       -6.85E+00  -6.85E+00
VCE       7.50E+00  7.50E+00
BETADC    1.00E+02  1.00E+02
GM        1.92E-02  1.92E-02
RPI       5.21E+03  5.21E+03
RX        1.00E+01  1.00E+01
RO        1.00E+12  1.00E+12
CBE       0.00E+00  0.00E+00
CBC       0.00E+00  0.00E+00
CJS       0.00E+00  0.00E+00
BETAAC    1.00E+02  1.00E+02
CBX       0.00E+00  0.00E+00
FT        3.06E+17  3.06E+17
    
```

รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์



รูปที่ 4.39 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ในกรณีวิธีผลต่าง

ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์ในกรณีวิธีผลรวมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์โดยการประกอบวงจร

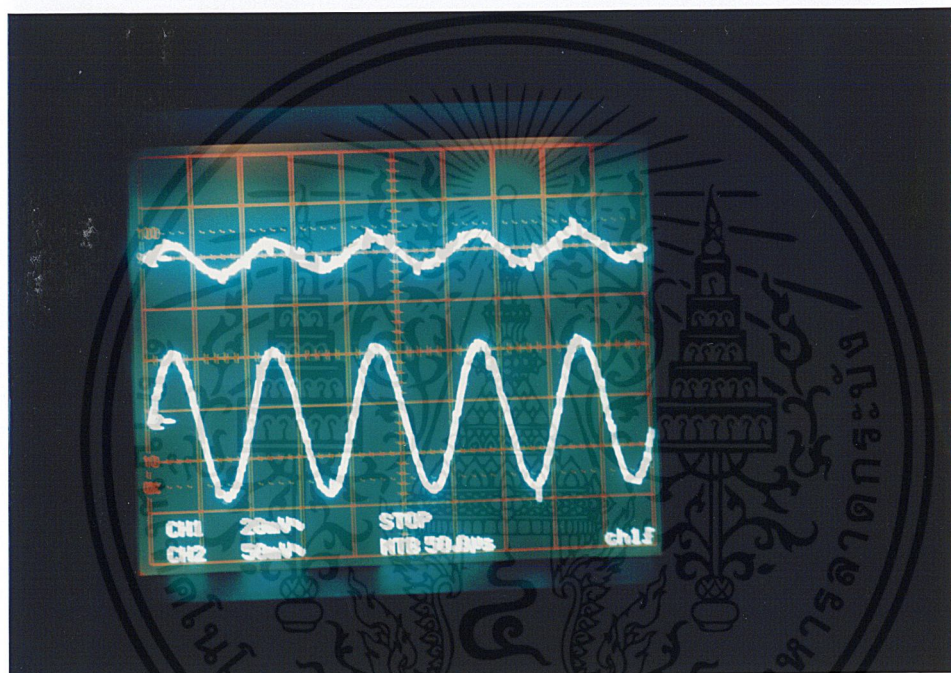
ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.37 ยังไม่ต้องป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรวัดหาคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรง โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลองดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{CC} &= 15 \text{ V} & ; & & V_{BE1} &= 0.59 \text{ V} \\
 V_{EE} &= -15 \text{ V} & ; & & V_{BE2} &= 0.59 \text{ V} \\
 V_{CE} &= 7.7 \text{ V} & ; & & V_{CE2} &= 8.03 \text{ V} \\
 I_{C1} &= 0.53 \text{ mA} & ; & & I_{C2} &= 0.49 \text{ mA} \\
 I_{EE} &= 1.02 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1) ผลตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์กรณิวิธีผลต่าง

ป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $20 \text{ mV}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ให้กับอินพุต 1 ของวงจร ส่วนอินพุต 2 ต่อลงกราวด์ ใช้  $R_L$  เท่ากับ  $1.5 \text{ k}\Omega$  ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.41



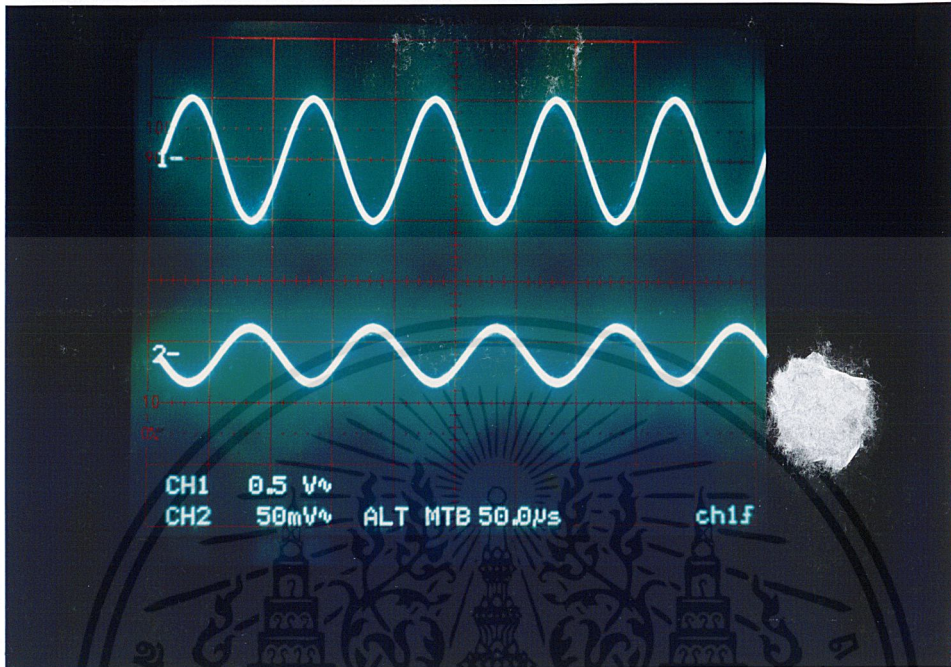
รูปที่ 4.41 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์กรณิวิธีผลต่าง

$$A_d = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{150 \text{ mV}}{20 \text{ mV}} = 7.5 \text{ เท่า}$$

2.2) ผลตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์กรณิวิธีผลรวม

ป้อนอินพุตเข้าที่ทั้งอินพุต 1 และ 2 พร้อมกันโดยใช้อินพุตรูปคลื่นไซน์ขนาด  $1 \text{ V}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ใช้  $R_L$  เท่ากับ  $10 \text{ k}\Omega$  ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.42 สัญญาณอิพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์กรณีวิธีผลร่วม

$$A_c = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{220 \text{ mV}}{1 \text{ V}} = 0.22 \text{ เท่า}$$

ดังนั้น

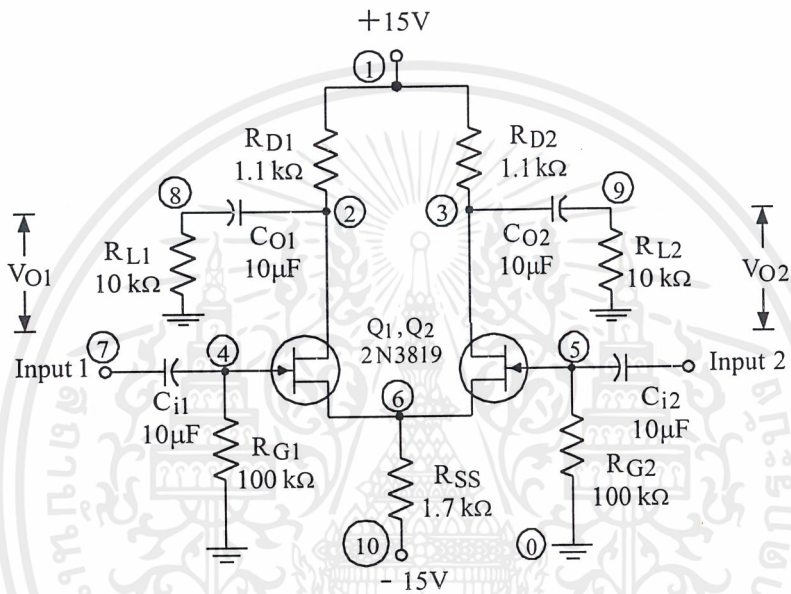
$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} = \frac{7.5}{0.22} = 34.09$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.8 การทดลองวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

ลักษณะของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองแสดงดัง

รูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 วงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

#### 1) การทดลองวงขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์วงจรแสดงดังรูปที่ 4.44 รูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.46

VCC	1	0	DC +15Volt
VEE	10	0	DC -15Volt
Vin	7	0	SIN(0 100mV 10kHz 00)
RD1	1	2	1.1k
RD2	1	3	1.1k
RG1	4	0	100k
RB2	5	0	100k
RL1	9	0	10K
RL2	8	0	10k
RSS	6	10	1.7k
Ci1	7	4	10uF
Ci2	5	7	10uF
Co1	2	9	10uF
Co2	3	8	10uF
J1	2	4	6 JM ; D G S
J2	3	5	6 JM ; D G S

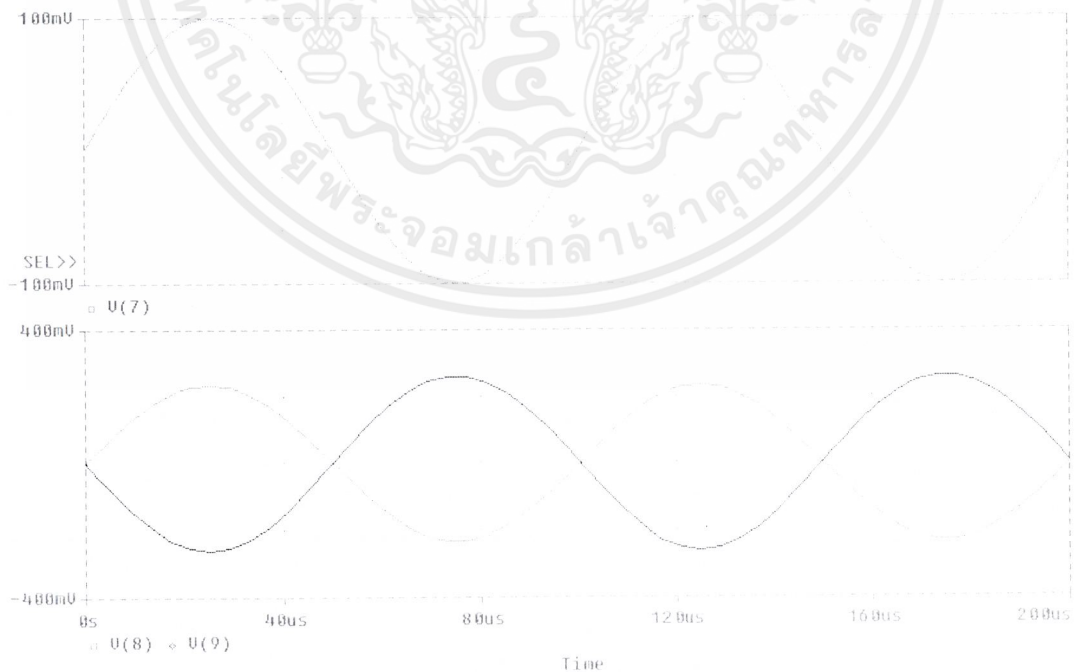
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

.MODEL JM NJF (BETA=1.25m VTO=-4)
.OP
.PROBE
.TRAN 1us 0.2ms
.END
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE
(1)  15.0000  (2)   9.5000  (3)   9.5000  (4)  1.152E-06
(5)  1.152E-06 (6)   2.0000  (7)   0.0000  (8)   0.0000
(9)  0.0000   (10) -15.0000
**** JFETS
NAME      J1      J2
MODEL     JM      JM
ID        5.00E-03  5.00E-03
VGS       -2.00E+00 -2.00E+00
VDS        7.50E+00  7.50E+00
GM         5.00E-03  5.00E-03
GDS        0.00E+00  0.00E+00
CGS        0.00E+00  0.00E+00
CGD        0.00E+00  0.00E+00

```

รูปที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์ทางด้านไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรถยายผลต่าง  
ที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.45 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรถยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

ในกรณีวิธีผลต่างที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า ในกรณีวิธีผลรวมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์โดยการประกอบวงจร

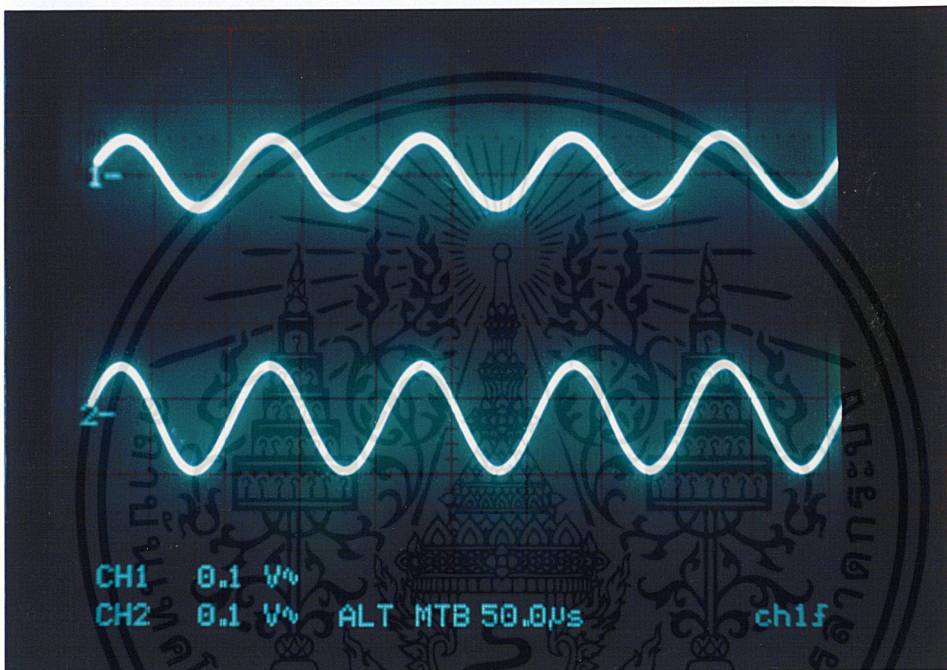
ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.43 ยังไม่ต้องป้อนสัญญาณอินพุตให้กับวงจรวัดหาคุณสมบัติทางด้านไฟกระแสตรงโดยใช้มัลติมิเตอร์วัดแรงดันและกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจร ได้ผลการทดลองดังนี้

$$\begin{aligned}
 V_{DD} &= 15 \text{ V} & ; & & V_{GS1} &= -1.1 \text{ V} \\
 V_{SS} &= -15 \text{ V} & ; & & V_{GS2} &= -1.1 \text{ V} \\
 V_{DS} &= 9.38 \text{ V} & ; & & V_{DS2} &= 8.3 \text{ V} \\
 I_{D1} &= 4.75 \text{ mA} & ; & & I_{D2} &= 5.87 \text{ mA} \\
 I_{SS} &= 10.4 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

### 2.1) ผลตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็ของวงจขยายผลต่าง ที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้ากรณีวิธีผลต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ขนาด  $100 \text{ mV}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ให้กับอินพุต 1 ของวงจร ส่วนอินพุต 2 ต่อดงกราวด์ ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า กรณีวิธีผลต่าง

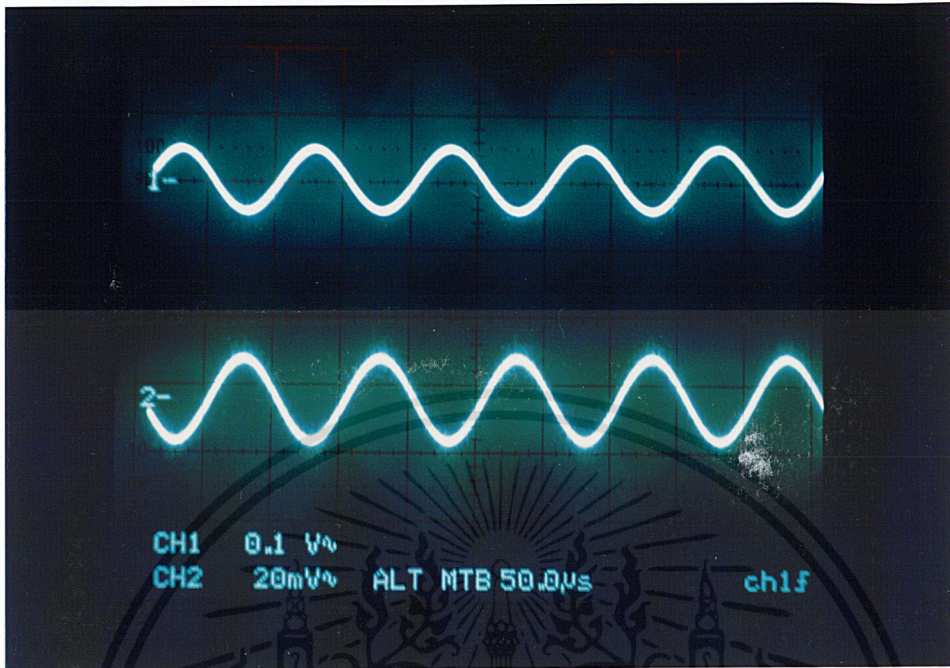
$$A_d = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{100 \text{ mV}}{145 \text{ mV}} = 1.45 \text{ เท่า}$$

2.2) ผลตอบสนองต่อสัญญาณขนาดเล็กของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์กรณีวิธี

ผลร่วม

ป้อนอินพุตเข้าที่ทั้งอินพุต 1 และ 2 พร้อมกันโดยใช้อินพุตรูปคลื่นไซน์ขนาด  $100 \text{ mV}_{p-p}$  ความถี่  $10 \text{ kHz}$  ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า  
กรณีวิธีผลรวม

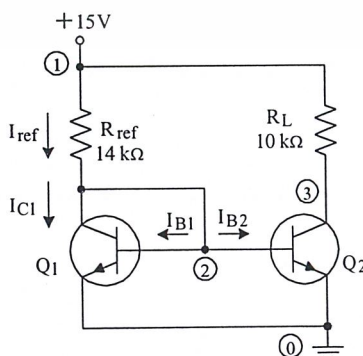
$$A_c = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{30 \text{ mV}}{100 \text{ mV}} = 0.3 \text{ เท่า}$$

ดังนั้น

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c} = \frac{1.45}{0.3} = 4.833$$

### 4.3.9 แหล่งจ่ายกระแสไมเตอร์

ลักษณะของวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 วงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเตอร์โดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเตอร์โดยใช้โปรแกรม Pspice แสดงดังรูปที่รูปที่ 4.50

```

VCC      1 0 DC +15V
Rref     1 2 14k
RL       1 3 10k
Q1       2 2 0 Q2N3904 ; C B E
Q2       3 2 0 Q2N3904 ; C B E
.MODEL  Q2N3904 NPN (Is=6.734E-15 BF=100 RB=10)
.OP
.END
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION  TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE     VOLTAGE     NODE     VOLTAGE     NODE     VOLTAGE
(1)      15.0000    (2)      .6655      (3)      4.9619
**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS
NAME     Q1         Q2
MODEL    Q2N3904   Q2N3904
IB       1.00E-05   1.00E-05
IC       1.00E-03   1.00E-03
VBE      6.66E-01   6.66E-01
VBC      0.00E+00   -4.30E+00
VCE      6.66E-01   4.96E+00
BETADC   1.00E+02   1.00E+02
GM       3.88E-02   3.88E-02
RPI      2.58E+03   2.58E+03
RX       1.00E+01   1.00E+01
RO       7.94E+11   1.00E+12
CBE      0.00E+00   0.00E+00
CBC      0.00E+00   0.00E+00
CJS      0.00E+00   0.00E+00
BETAAC   1.00E+02   1.00E+02
CBX      0.00E+00   0.00E+00
FT       6.18E+17   6.18E+17

```

รูปที่ 4.50 ผลการวิเคราะห์วงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเตอร์ด้วย โปรแกรม Pspice

### 2) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเตอร์ โดยการประกอบวงจร

ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.49 ใช้มัลติมิเตอร์วัดกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลอง

ดังนี้

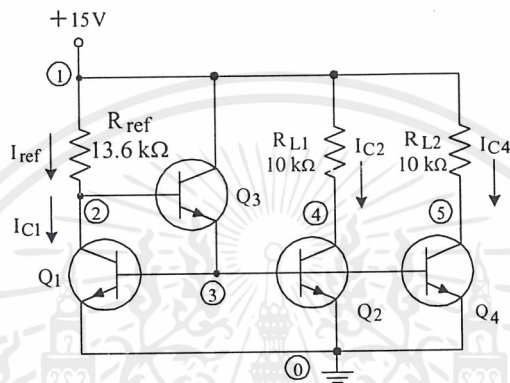
$$I_O = I_{C2} = 0.99 \text{ mA}$$

$$I_{ref} = 1 \text{ mA}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.10 วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต

ลักษณะของวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต

1) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุตโดยใช้โปรแกรมPspice

ผลการทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุตโดยใช้โปรแกรม Pspice แสดงดังรูปที่ 4.52

```
VCC      1 0  DC +15V
Rref     1 2  13.6k
RL1      1 4  10k
RL2      1 5  10k
Q1       2 3 0  Q2N3904 ; C B E
Q2       4 3 0  Q2N3904 ; C B E
Q3       1 2 3  Q2N3904 ; C B E
Q4       5 3 0  Q2N3904 ; C B E
.MODEL   Q2N3904 NPN (Is=6.734E-15 BF=100 RB=10)
.OP
.END
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE     VOLTAGE  NODE     VOLTAGE  NODE     VOLTAGE  NODE     VOLTAGE
(1)      15.0000  (2)      1.2404  (3)      .6657    (4)      4.8856
(5)      4.8856
**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS
NAME     Q1          Q2          Q3          Q4
MODEL    Q2N3904    Q2N3904    Q2N3904    Q2N3904
IB       1.01E-05    1.01E-05    3.00E-07    1.01E-05
IC       -1.01E-03  1.01E-03    3.00E-05    1.01E-03
VBE     6.66E-01    6.66E-01    5.75E-01    6.66E-01
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VBC	-5.75E-01	-4.22E+00	-1.38E+01	-4.22E+00
VCE	1.24E+00	4.89E+00	1.43E+01	4.89E+00
BETADC	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
GM	3.91E-02	3.91E-02	1.16E-03	3.91E-02
RPI	2.56E+03	2.56E+03	8.61E+04	2.56E+03
RX	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
RO	1.00E+12	1.00E+12	1.00E+12	1.00E+12
CBE	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CBC	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CJS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
BETAAC	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
CBX	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FT	6.22E+17	6.22E+17	1.85E+16	6.22E+17

รูปที่ 4.52 ผลการวิเคราะห์วงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุตด้วย

โปรแกรม Pspice

2) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุตโดยการประกอบวงจรประกอบวงจรตามรูปที่ 4.51 ใช้มัลติมิเตอร์กระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลองดัง

ใน

$$I_{C2} = 1.01 \text{ mA}$$

$$I_{C4} = 1.01 \text{ mA}$$

$$I_{\text{ref}} = 1.01 \text{ mA}$$

#### 4.3.11 วงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคด

ลักษณะของวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคด ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.54

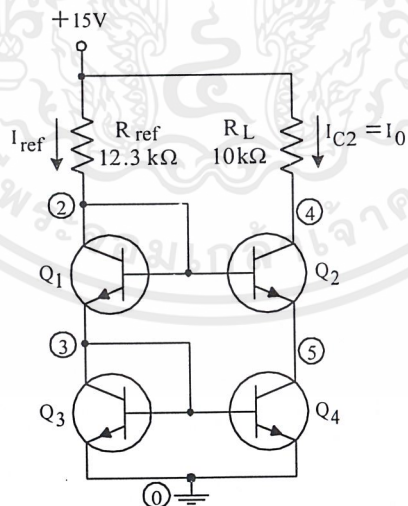
1) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคดโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคดโดยใช้โปรแกรม Pspice แสดงดังรูปที่ 4.53

```
VCC      1 0 DC +15V
R1       1 2 12.3k
RL       1 4 10k
Q1       2 2 3 Q2N3904 ; C B E
Q2       4 2 5 Q2N3904 ; C B E
Q3       3 3 0 Q2N3904 ; C B E
Q4       5 3 0 Q2N3904 ; C B E
.MODEL  Q2N3904 NPN (Is=6.734E-15 BF=100 RB=10)
.OP
.END
```

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION					TEMPERATURE = 27.000 DEG C		
NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
(1)	15.0000	(2)	1.3350	(3)	.6674	(4)	4.3196
(5)	.6679						
**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS							
NAME	Q1	Q2	Q3	Q4			
MODEL	Q2N3904	Q2N3904	Q2N3904	Q2N3904			
IB	1.09E-05	1.07E-05	1.08E-05	1.08E-05			
IC	1.09E-03	1.07E-03	1.08E-03	1.08E-03			
VBE	6.68E-01	6.67E-01	6.67E-01	6.67E-01			
VBC	0.00E+00	-2.98E+00	0.00E+00	0.00E+00			-5.14E-04
VCE	6.68E-01	3.65E+00	6.67E-01	6.67E-01			6.68E-01
BETADC	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02			1.00E+02
GM	4.21E-02	4.13E-02	4.17E-02	4.17E-02			4.17E-02
RPI	2.37E+03	2.42E+03	2.40E+03	2.40E+03			2.40E+03
RX	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01			1.00E+01
RO	7.94E+11	1.00E+12	7.94E+11	7.97E+11			7.97E+11
CBE	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			0.00E+00
CBC	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			0.00E+00
CJS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			0.00E+00
BETAAC	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02			1.00E+02
CBX	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			0.00E+00
FT	6.70E+17	6.57E+17	6.64E+17	6.64E+17			6.64E+17

รูปที่ 4.53 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคตด้วยโปรแกรม Pspice



รูปที่ 4.54 วงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคต

## 2) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคตโดยการประกอบวงจร

ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.54 ใช้มัลติมิเตอร์วัดกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจรได้ผลการทดลอง

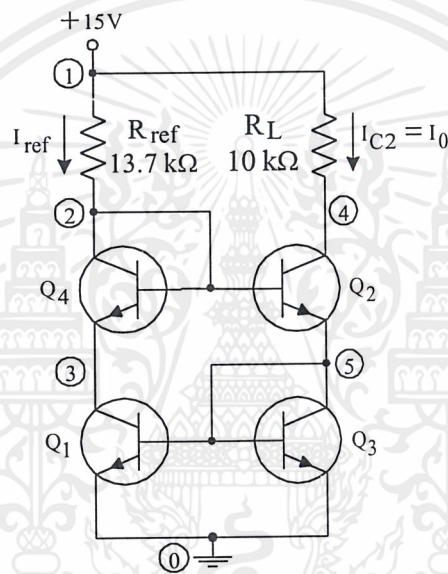
ดังต่อไปนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{C2} = 0.98 \text{ mA}$$

$$I_{ref} = 1 \text{ mA}$$

#### 4.3.12 วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลัน

ลักษณะของวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลัน ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.55



รูปที่ 4.55 วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลัน

#### 1) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลันโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลัน โดยใช้โปรแกรม Pspice แสดงดังรูปที่ 4.56

```

VCC      1 0  DC +15V
R1       1 2  13.7k
RL       1 4  10k
Q1       2 2 3  Q2N3904 ; C B E
Q2       4 2 5  Q2N3904 ; C B E
Q3       3 5 0  Q2N3904 ; C B E
Q4       5 5 0  Q2N3904 ; C B E
.MODEL  Q2N3904 NPN (Is=6.734E-15 BF=100 RB=10)
.OP
.END
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION  TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE  NODE  VOLTAGE
(1)   15.0000 (2)   1.3305 (3)   .6656 (4)   5.0242
(5)   .6651

```

**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS				
NAME	Q1	Q2	Q3	Q4
MODEL	Q2N3904	Q2N3904	Q2N3904	Q2N3904
IB	9.78E-06	9.98E-06	9.88E-06	9.88E-06
IC	9.78E-04	9.98E-04	9.88E-04	9.88E-04
VBE	6.65E-01	6.65E-01	6.65E-01	6.65E-01
VBC	0.00E+00	-3.69E+00	-5.14E-04	0.00E+00
VCE	6.65E-01	4.36E+00	6.66E-01	6.65E-01
BETADC	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
GM	3.78E-02	3.86E-02	3.82E-02	3.82E-02
RPI	2.64E+03	2.59E+03	2.62E+03	2.62E+03
RX	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01	1.00E+01
RO	7.94E+11	1.00E+12	7.97E+11	7.94E+11
CBE	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CBC	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
CJS	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
BETAAC	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
CBX	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
FT	6.02E+17	6.14E+17	6.08E+17	6.08E+17

รูปที่ 4.56 ผลการวิเคราะห์วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตสันด้วยโปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตสัน โดยการประกอบวงจร

ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.55 ใช้มัลติมิเตอร์วัดกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจร ได้ผลการทดลอง

ดังนี้

$$I_{C2} = 0.98 \text{ mA}$$

$$I_{ref} = 1.04 \text{ mA}$$

### 4.3.13 วงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลาร์

ลักษณะของวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลาร์ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.58

#### 1) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลาร์ โดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิตลาร์ โดยใช้โปรแกรม Pspice แสดงดังรูปที่ 4.57

VCC	1	0	DC +15V
R1	1	2	14.3k
R2	4	0	27.5k
RL	1	3	10k
Q1	2	2	0 Q2N3904 ; C B E
Q2	3	2	4 Q2N3904 ; C B E
.MODEL	Q2N3904	NPN	(Is=6.734E-15 BF=100 RB=10)
.OP			
.END			

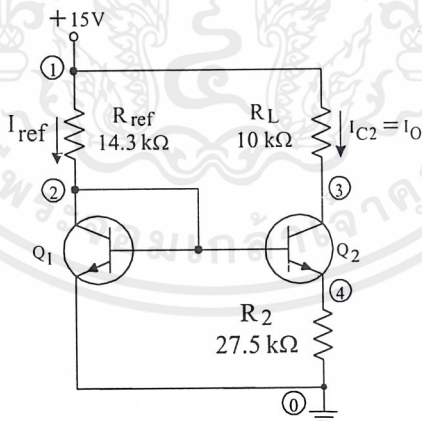
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยประการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION      TEMPERATURE = 27.000 DEG C
  NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE
  (1)  15.0000  (2)   .6652  (3)  14.9510  (4)   .1372
**** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS
  NAME      Q1      Q2
  MODEL     Q2N3904  Q2N3904
  IB        9.92E-06  4.94E-08
  IC        9.92E-04  4.94E-06
  VBE       6.65E-01  5.28E-01
  VBC       0.00E+00 -1.43E+01
  VCE       6.65E-01  1.48E+01
  BETADC    1.00E+02  1.00E+02
  GM        3.84E-02  1.91E-04
  RPI       2.61E+03  5.23E+05
  RX        1.00E+01  1.00E+01
  RO        7.94E+11  1.00E+12
  CBE       0.00E+00  0.00E+00
  CBC       0.00E+00  0.00E+00
  CJS       0.00E+00  0.00E+00
  BETAAC    1.00E+02  1.00E+02
  CBX       0.00E+00  0.00E+00
  FT        6.11E+17  3.04E+15
    
```

รูปที่ 4.57 ผลการวิเคราะห์วงจรแหล่งจ่ายกระแสตัวด้วยโปรแกรม Pspice



รูปที่ 4.58 วงจรแหล่งจ่ายกระแสตัว

2) การทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสตัว โดยการประกอบวงจร

ประกอบวงจรตามรูปที่ 4.58 ใช้มัลติมิเตอร์วัดกระแสที่จุดต่างๆ ของวงจร ได้ผลการทดลอง ดังนี้

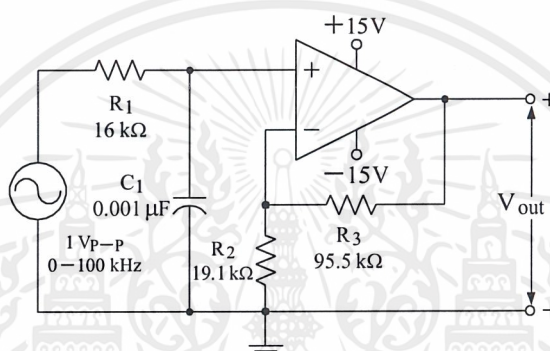
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{C2} = 5 \mu\text{A}$$

$$I_{\text{ref}} = 1.05 \text{ mA}$$

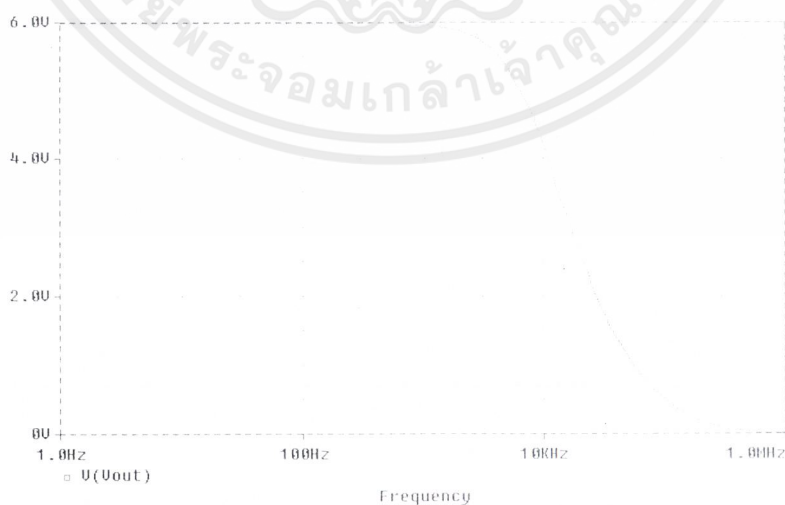
#### 4.3.14 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1

ลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.59



รูปที่ 4.59 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz

1) การทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice ผลการวิเคราะห์ห้วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz แสดงดังรูปที่ 4.60



รูปที่ 4.60 ผลการวิเคราะห์ของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz

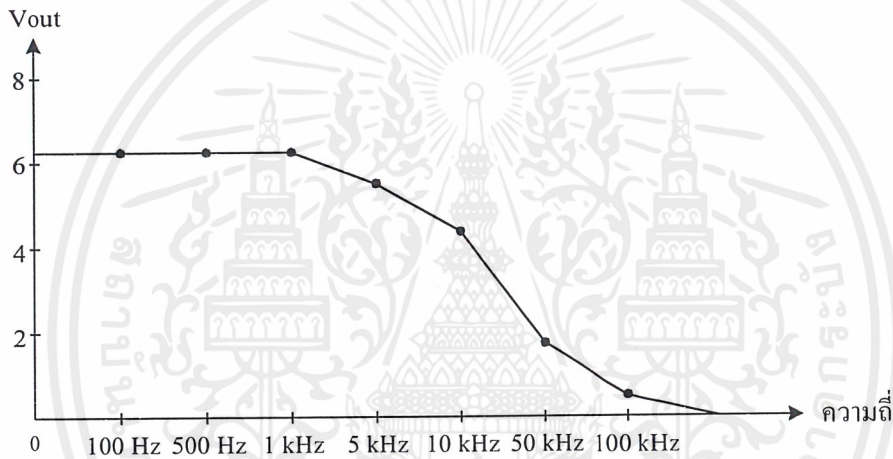
โดยใช้โปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz โดยการประกอบวงจร

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz

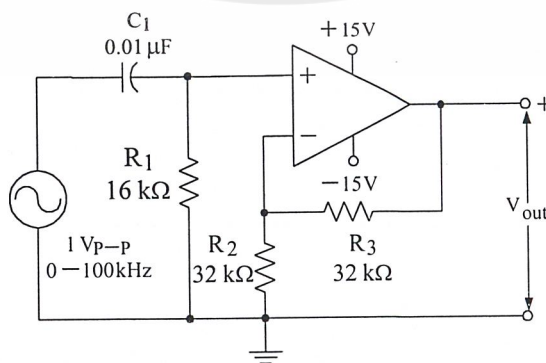
ความถี่	100 Hz	500 Hz	1 kHz	5 kHz	10 kHz	50 kHz	100 kHz
Vout	6.28 V	6.28 V	6.28 V	5.57 V	4.30 V	1.17 V	588 mV



รูปที่ 4.61 ผลการทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ความถี่ 10 kHz

#### 4.3.15 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1

ลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1 ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.62



รูปที่ 4.62 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การทดลองวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice  
ผลการวิเคราะห์ห้วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz แสดงดังรูปที่ 4.63



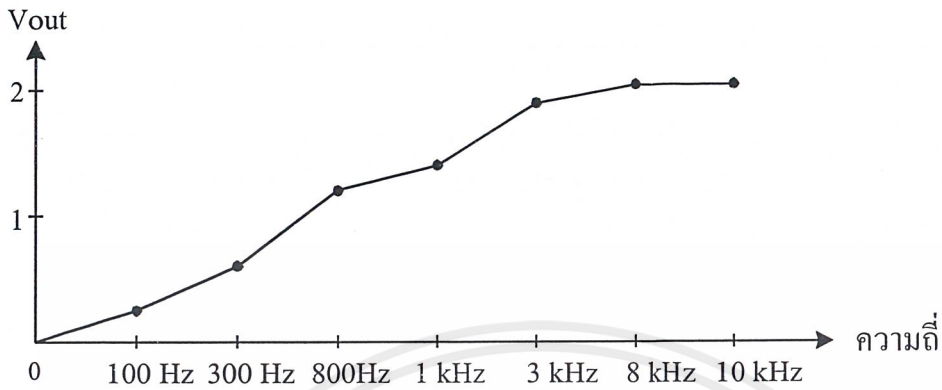
รูปที่ 4.63 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz  
โดยใช้โปรแกรม Pspice

2) การทดลองวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz โดยการประกอบวงจร

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz

ความถี่	100 Hz	300 Hz	800 Hz	1 kHz	3 kHz	8 kHz	10 kHz
Vout	245 mV	620 mV	1.33 V	1.51 V	1.99 V	2.07 V	2.07 V

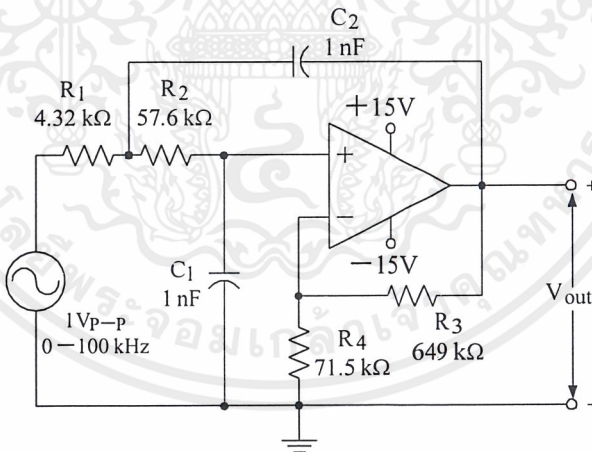
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.64 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1 ที่ความถี่ 1 kHz

### 4.3.16 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2

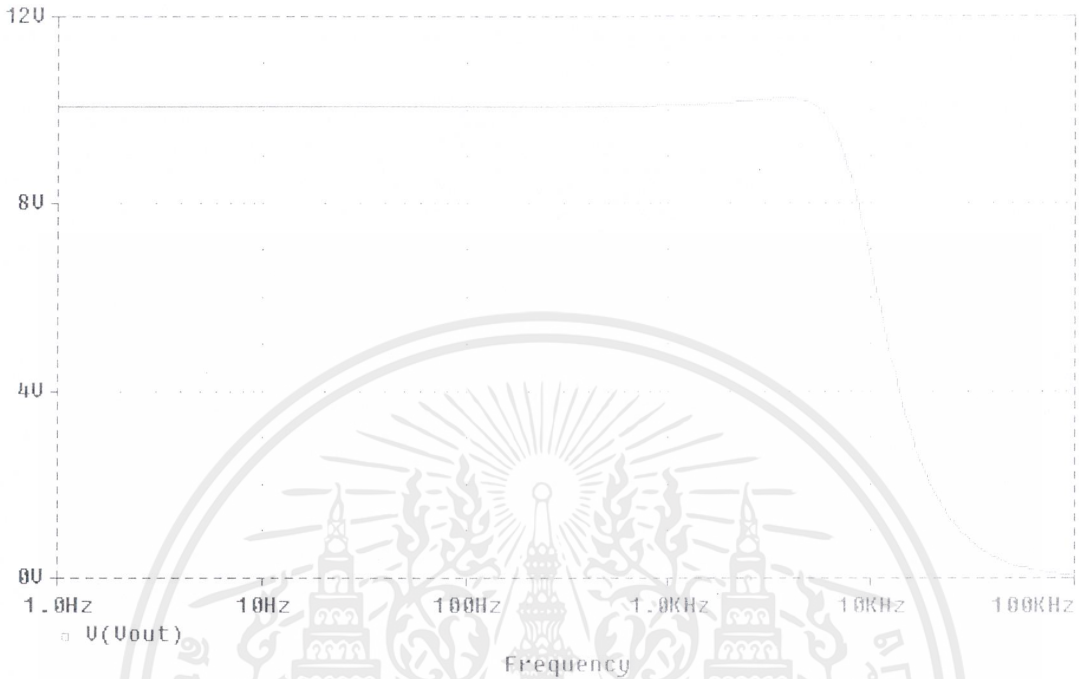
ลักษณะของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.65



รูปที่ 4.65 วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz

1) การทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz แสดงดังรูปที่ 4.66



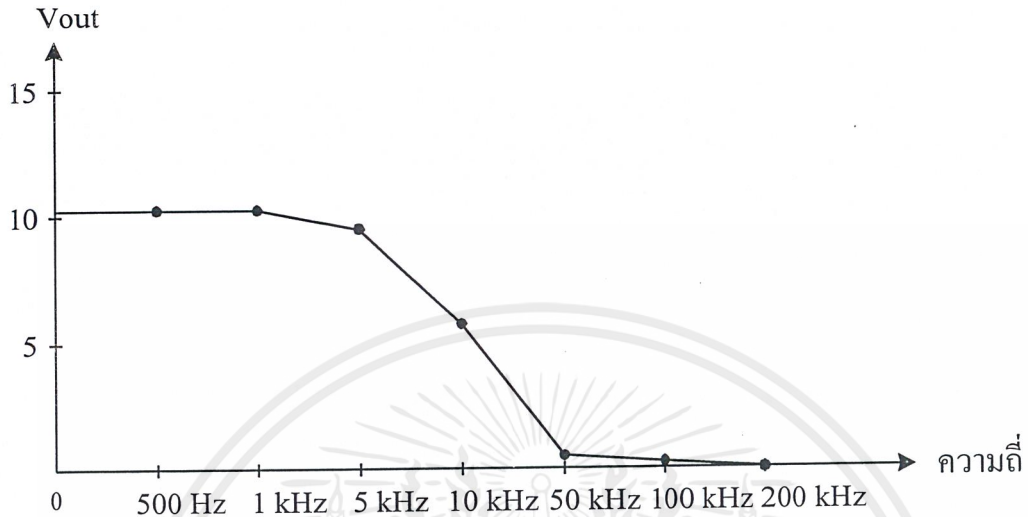
รูปที่ 4.66 ผลการวิเคราะห์ห้วงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz  
โดยใช้โปรแกรม Pspice

## 2) การทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ความถี่ 10kHz โดยการประกอบวงจร

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz

ความถี่	500 Hz	1 kHz	5 kHz	10 kHz	50 kHz	100 kHz	200 kHz
Vout	10.3 V	10.4 V	9.79 V	6.53 V	356 mV	91.4 mV	30.2 mV

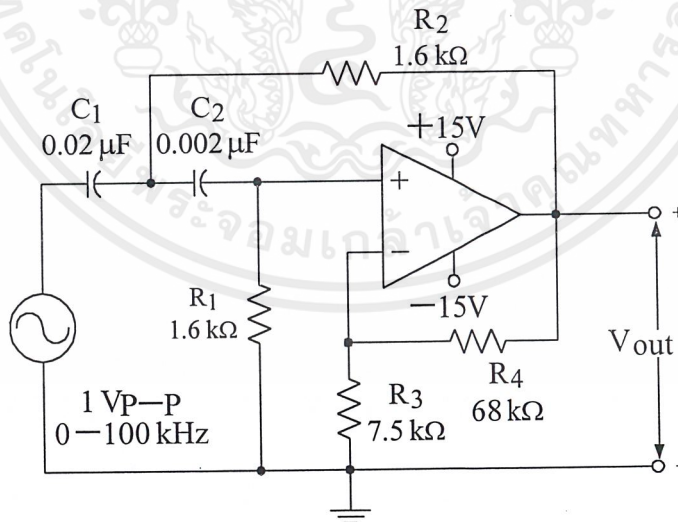
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz

### 4.3.17 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2

ลักษณะของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.68

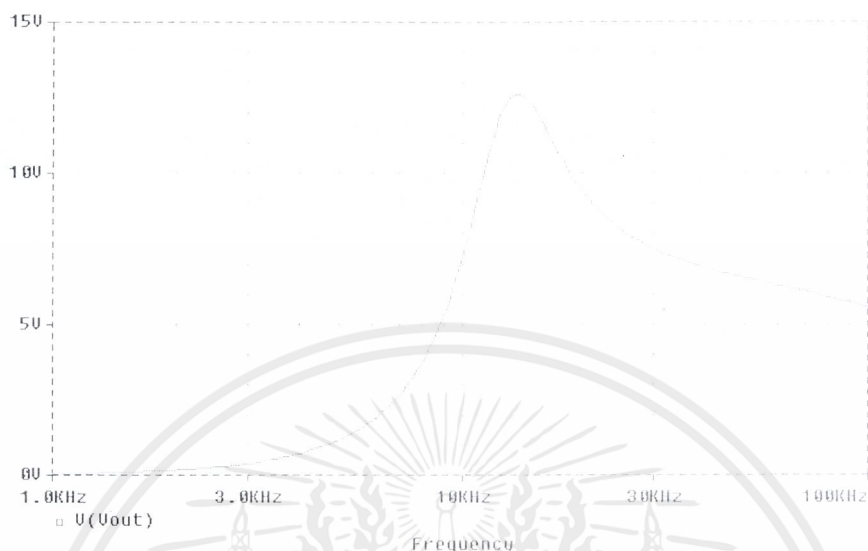


รูปที่ 4.68 วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz

1) การทดลองวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์ห้วงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz แสดงดังรูปที่ 4.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

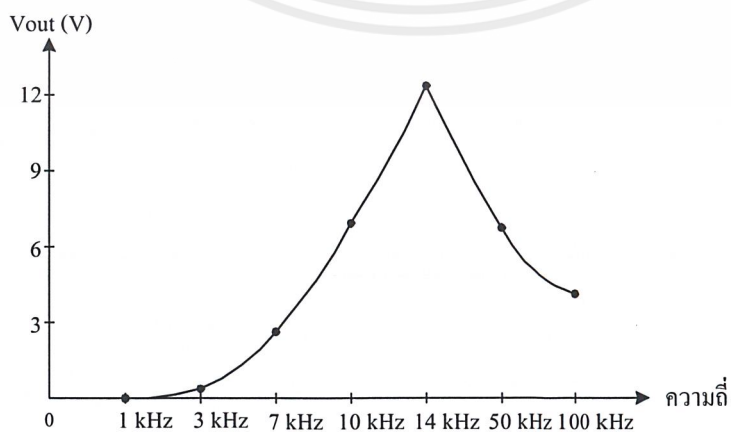


**รูปที่ 4.69** ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice

2) การทดลองวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ความถี่ 100Hz โดยการประกอบวงจร

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz

ความถี่	1 kHz	3 kHz	7 kHz	10 kHz	14 kHz	50 kHz	100 kHz
Vout	100 mV	400 mV	2.8 V	7 V	12.5 V	6.8 V	5.6 V

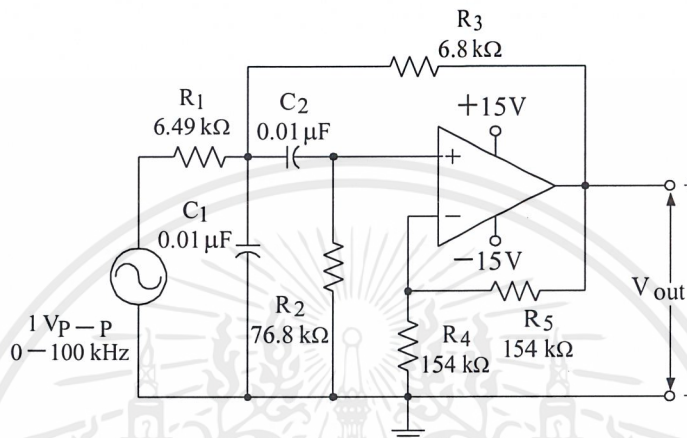


**รูปที่ 4.70** ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2 ที่ความถี่ 10 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

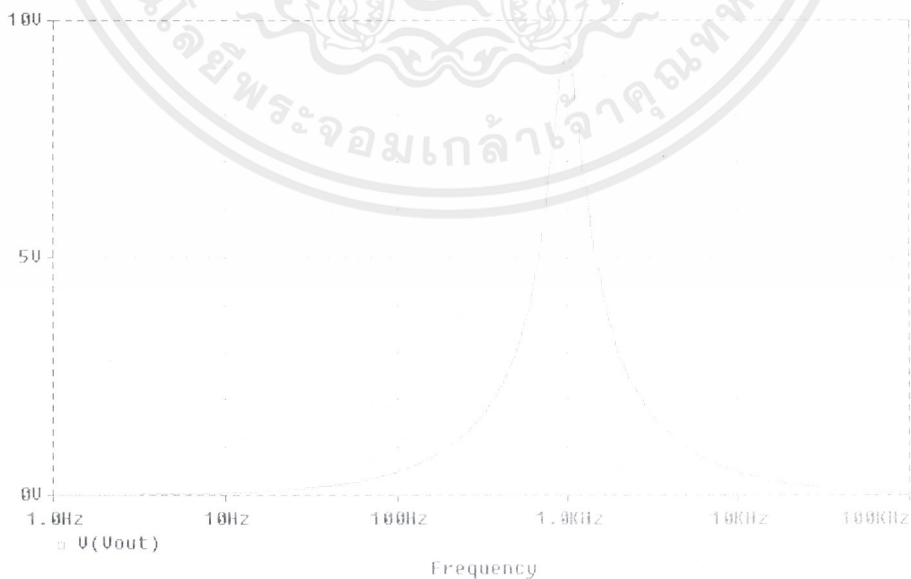
### 4.3.18 วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่

ลักษณะของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.71



รูปที่ 4.71 วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ที่ความถี่ 1 kHz

1) การทดลองวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ ที่ความถี่ 1 kHz โดยใช้โปรแกรม Pspice  
ผลการวิเคราะห์วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ที่ความถี่ 1 kHz แสดงดังรูปที่ 4.72



รูปที่ 4.72 ผลการวิเคราะห์วงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ที่ความถี่ 1 kHz

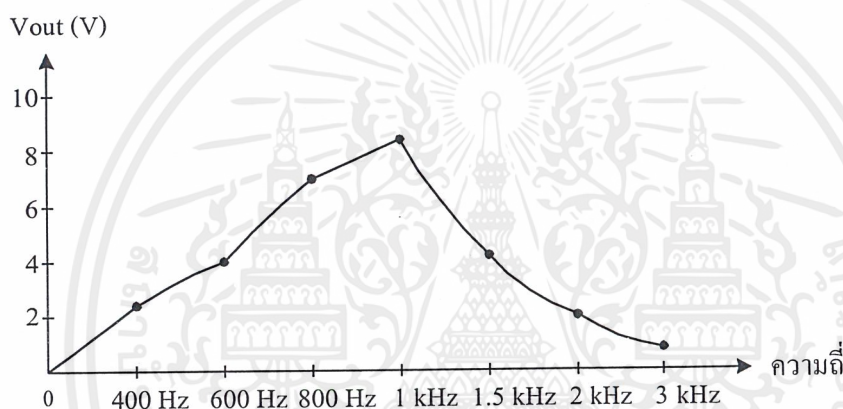
โดยใช้โปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) การทดลองวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ที่ความถี่ 1 kHz โดยการประกอบวงจร

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ที่ความถี่ 1 kHz

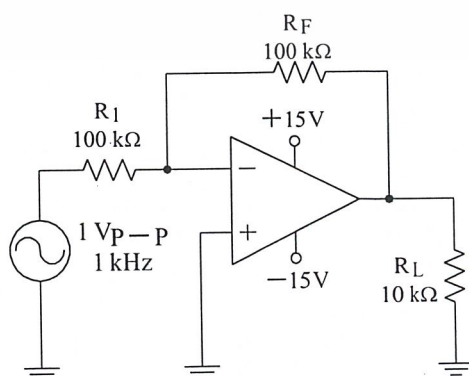
ความถี่	400 Hz	600 Hz	800 Hz	1 kHz	1.5 kHz	2 kHz	3 kHz
Vout	2.21 V	4.06 V	7 V	8.52 V	4.22 V	2.77 V	1.66 V



รูปที่ 4.73 ผลการทดลองของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่ที่ความถี่ 1 kHz

### 4.3.19 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส

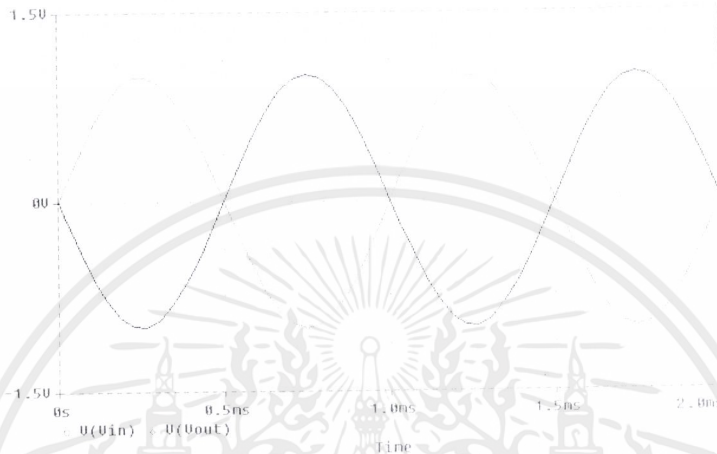
ลักษณะของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.74



รูปที่ 4.74 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส

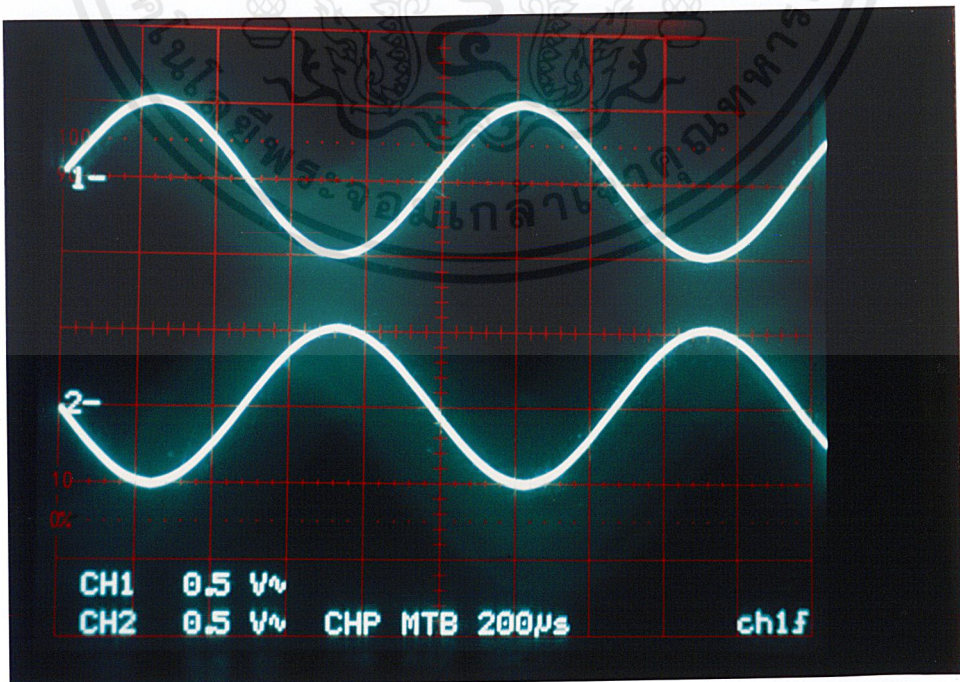
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การทดลองวงจรรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสโดยใช้โปรแกรม Pspice  
ผลการวิเคราะห์ห้วงจรรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสแสดงดังรูปที่ 4.75



รูปที่ 4.75 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส  
ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Pspice

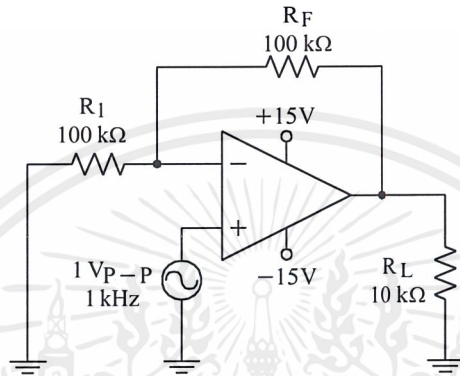
2) การทดลองวงจรรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสโดยการประกอบวงจร



รูปที่ 4.76 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟส  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.20 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส

ลักษณะของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส ที่ใช้ในการทดลองแสดง  
 ดังรูปที่ 4.77

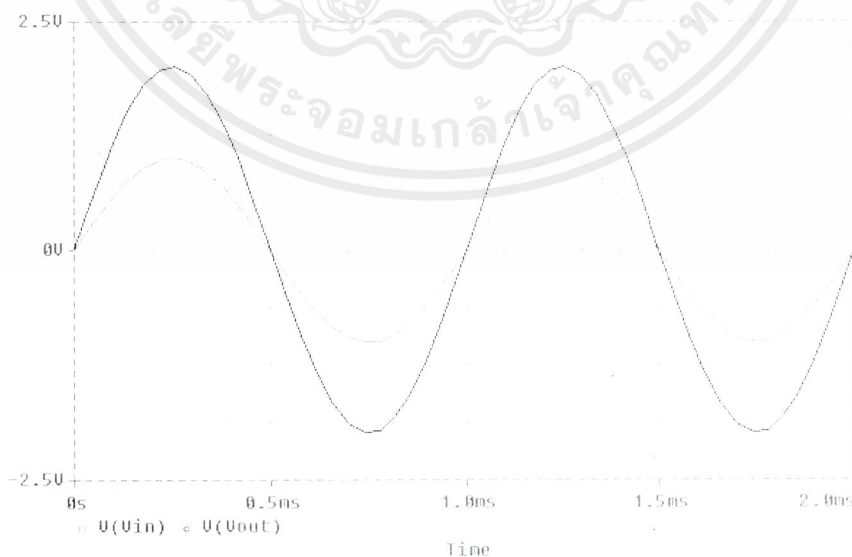


รูปที่ 4.77 วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส

1) การทดลองวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสโดยใช้โปรแกรม

**Pspice**

ผลการวิเคราะห์วงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส แสดงดังรูปที่ 4.78

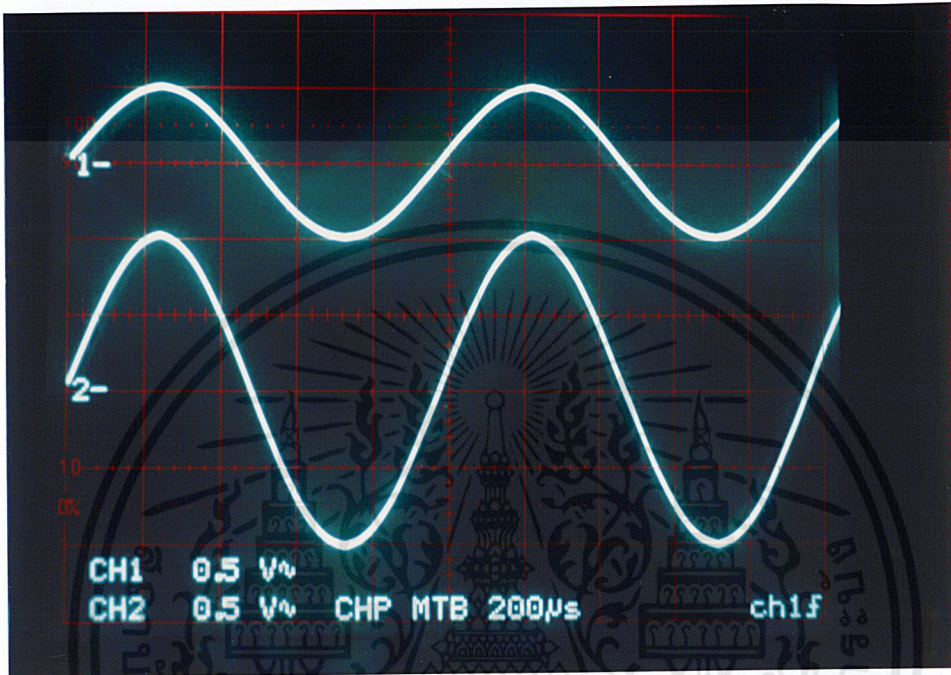


รูปที่ 4.78 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส

ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

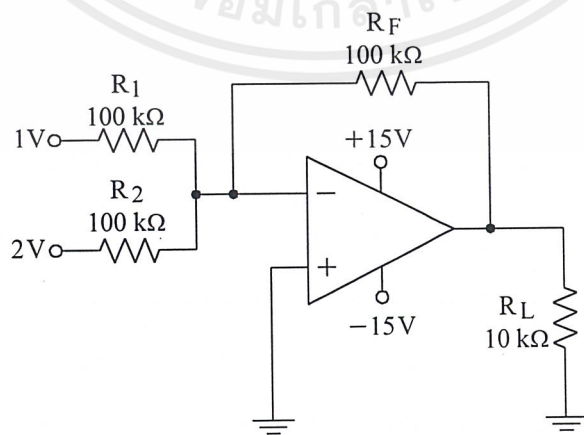
2) การทดลองวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส โดยการประกอบวงจร



รูปที่ 4.79 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบไม่กลับเฟส

#### 4.3.21 วงจรผลรวม

ลักษณะของวงจรวงจรผลรวม ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.80

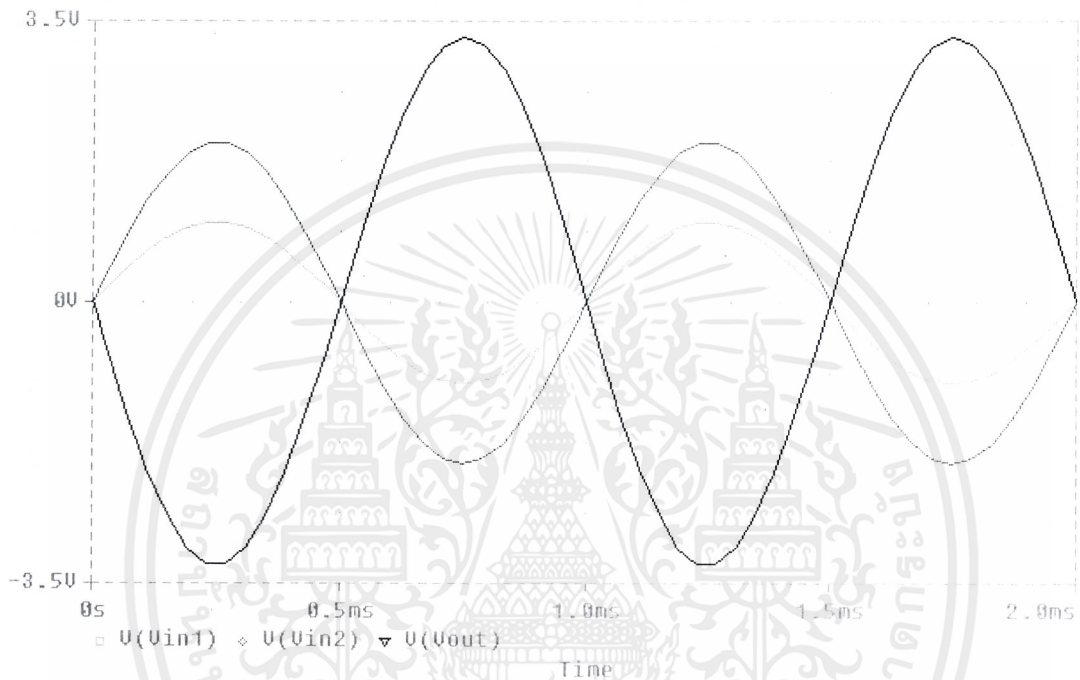


รูปที่ 4.80 วงจรผลรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) การทดลองวงจรผลรวมโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์ห้วงจรผลรวมแสดงดังรูปที่ 4.81



รูปที่ 4.81 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรผลรวมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Pspice

2) การทดลองวงจรผลรวม โดยการประกอบวงจร

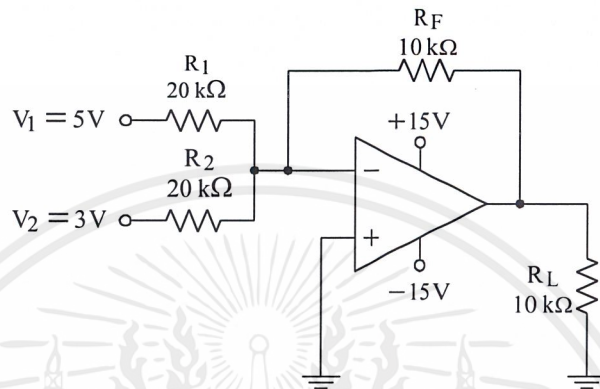
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของวงจรผลรวม

$V_1$	$V_2$	$V_o$
1 V	2 V	3 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.22 วงจรค่าเฉลี่ย

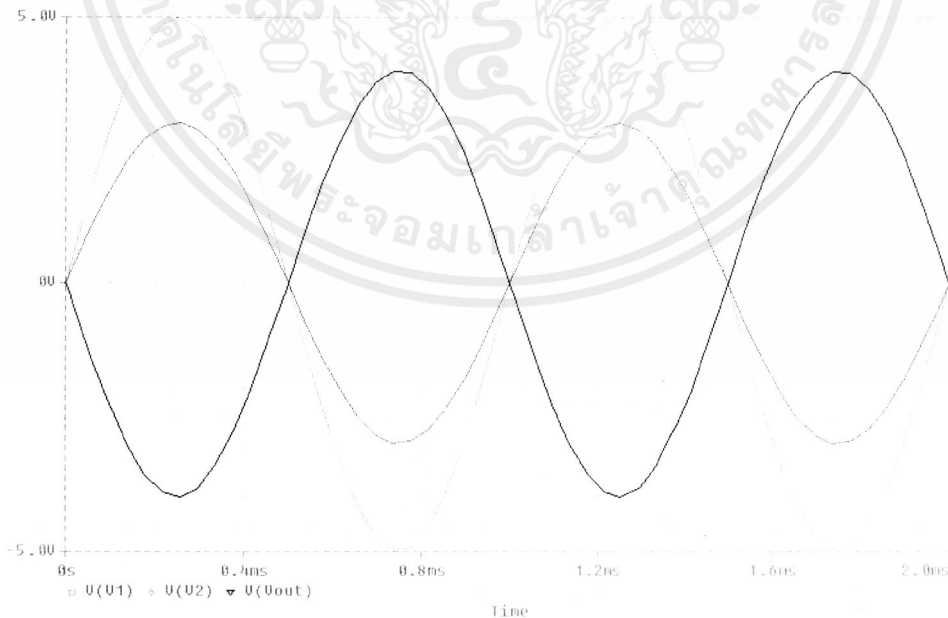
ลักษณะของวงจรค่าเฉลี่ยที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.82



รูปที่ 4.82 วงจรค่าเฉลี่ย

#### 1) การทดลองวงจรค่าเฉลี่ยโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์ห้วงจรวงจรค่าเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 4.83



รูปที่ 4.83 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Pspice

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

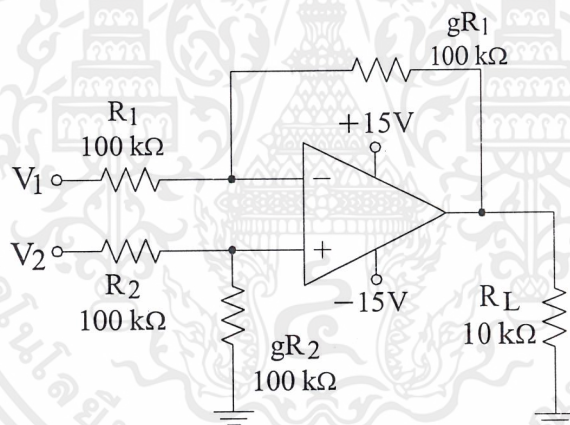
## 2) การทดลองวงจรค่าเฉลี่ย โดยการประกอบวงจร

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองของวงจรค่าเฉลี่ย

$V_1$	$V_2$	$V_C$
5 V	3 V	4 V

### 4.3.23 วงจรขยายผลต่าง

ลักษณะของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.84

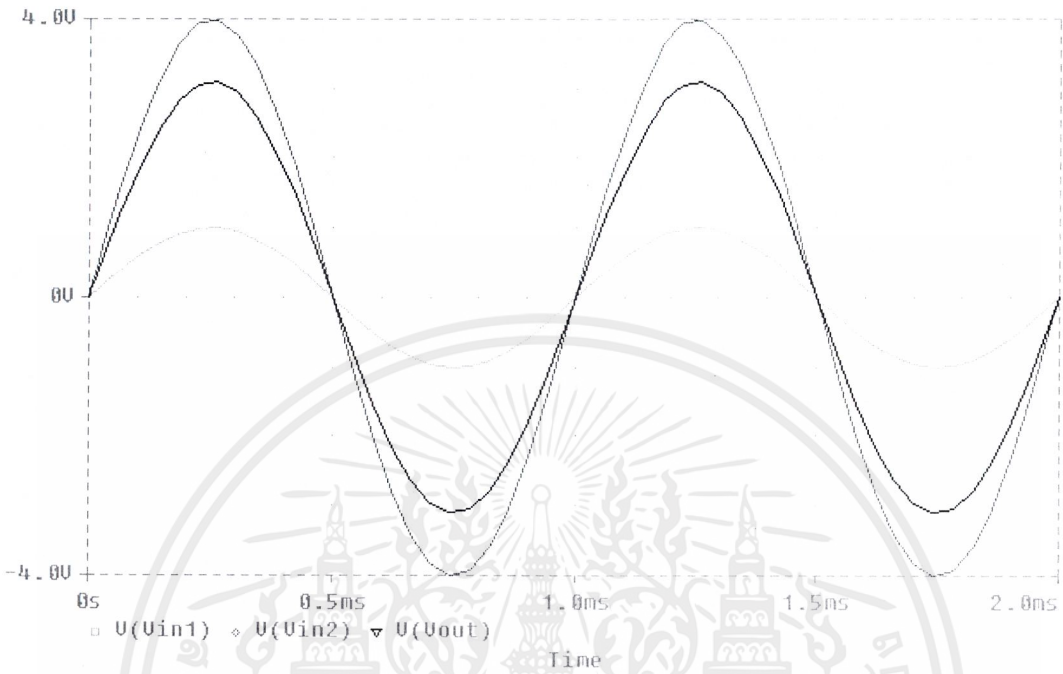


รูปที่ 4.84 วงจรขยายผลต่าง

### 1) การทดลองวงจรขยายผลต่างโดยใช้โปรแกรม Pspice

ผลการวิเคราะห์ห้วงจรขยายผลต่างแสดงดังรูปที่ 4.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.85 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายผลต่างที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Pspice

2) การทดลองวงจรขยายผลต่างโดยการประกอบวงจร

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองของวงจรค่าผลต่าง

$V_1$	$V_2$	$V_o$
4 V	3 V	1 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป ปัญหา แนวทางแก้ไข และพัฒนา

#### 5.1 บทสรุป

ชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว ที่จัดทำขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ

ส่วนที่ 1 การทดลองชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว

ส่วนที่ 2 การทดลองแผงวงจรปฏิบัติการทดลอง กับออสซิลโลสโคป และจิตอลมิเตอร์

โดยการทดลองทั้งสองส่วน สามารถวัดและทดสอบตามจุดต่าง ๆ ที่ต้องการได้ โดยสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป และจิตอลมิเตอร์ อาจเกิดความผิดพลาดของสัญญาณบ้างเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ โปรแกรมวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า Pspice แต่ก็ได้แก้ไขให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุดแล้ว

#### 5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

ในการจัดทำโครงการชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว สามารถสรุปปัญหาที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

##### ปัญหา

1) อุปกรณ์เชื่อมต่อ จุดต่ออุปกรณ์ และขาอุปกรณ์ จัดทำได้ยาก เพราะมีขนาดเล็ก และมีกระบวนการจัดทำที่สลับซับซ้อน และมีจำนวนมาก จึงใช้เวลานาน แนวทางแก้ไข อุปกรณ์เชื่อมต่อ จุดต่ออุปกรณ์ และขาอุปกรณ์ จะมีการจัดทำโดยใช้เวลาว่าง เพื่อจะได้อุปกรณ์จำนวนมาก และเสร็จทันเวลา

##### ปัญหา

2) อุปกรณ์ที่มีขายในท้องตลาดมีค่าไม่ตรงกับค่าอุปกรณ์ที่ออกแบบวงจรจึงทำให้ค่าที่วัดได้จากการทดลองไม่ตรงกับทฤษฎี แนวทางแก้ไข เลือกราคาอุปกรณ์ที่มีค่าใกล้เคียงที่สุดที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด

##### ปัญหา

3) อุปกรณ์ในการทดลอง เช่น ออสซิลโลสโคป จิตอลมิเตอร์ ฟังก์ชันเจนเนเรเตอร์ และอุปกรณ์อื่น ในห้องปฏิบัติการมีจำนวนน้อย และชำรุดจำนวนมากจึงทำให้การทดลองล่าช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**แนวทางแก้ไข** ในการทดลอง จะต้องพยายามใช้อุปกรณ์ในการทดลอง เช่น ออสซิลโลสโคป มัลติมิเตอร์ ฟังก์ชันเจนเนเรเตอร์ และอุปกรณ์อื่น ๆ จะต้องใช้ชุดเดียวกันเพื่อเป็นมาตรฐานการวัดเดียวกัน

#### ปัญหา

4) บอร์ดปฏิบัติการทดลอง มีการออกแบบและทำยากจึงทำให้ใช้เวลานาน **แนวทางแก้ไข** บอร์ดปฏิบัติการทดลอง ทำการออกแบบให้เร็วที่สุด และทำการสั่งทำบอร์ด บางส่วนจะจัดทำเอง เพื่อความรวดเร็วในการจัดทำบอร์ด

#### ปัญหา

5) จากการทดลอง ผลการทดลองที่ได้บางวงจร ไม่ตรงตามทฤษฎี เนื่องจากอุปกรณ์และการรบกวนของสิ่งต่าง ๆ **แนวทางแก้ไข** เลือกอุปกรณ์ที่มีคุณภาพที่สุด โดยไม่มีผลต่อการรบกวนของสิ่งต่าง ๆ

#### ปัญหา

6) ลายวงจรด้านบนของแผงทดลองทำจากสติกเกอร์จึงทำให้มีอายุการใช้งานไม่นานมากนัก **แนวทางแก้ไข** ควรเลือกวัสดุที่ใช้ทำลายวงจรที่มีคุณภาพมากกว่านี้

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

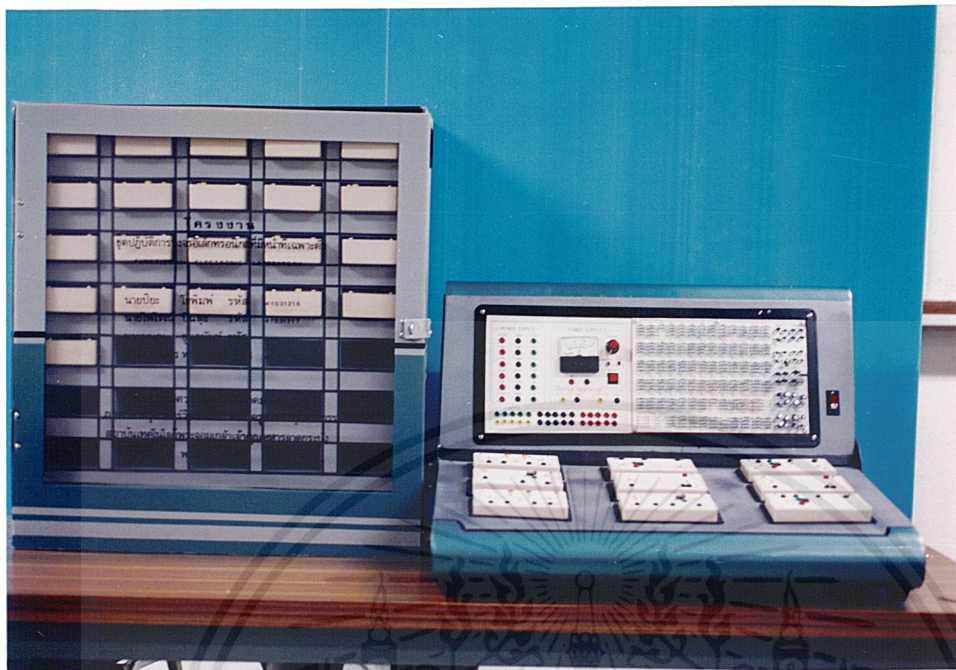
- 1) ลายวงจรด้านบนของแผงวงจรทดลองทำจากพลาสติกเกอร์ จึงทำให้มีอายุการใช้งานไม่นานนักควรเลือกวัสดุที่ใช้ทำลายวงจรที่มีอายุการใช้งานมากกว่านี้
- 2) แผงวงจรทดลองควรมีจำนวนมากกว่านี้ เพื่อจะได้มีการทดลองที่ครอบคลุมเนื้อหามากกว่านี้
- 3) เครื่องต้นแบบทำจากพลาสติกจึงมีการชำรุดได้ง่าย ควรเปลี่ยนวัสดุที่ทำให้แข็งแรงกว่า

๕

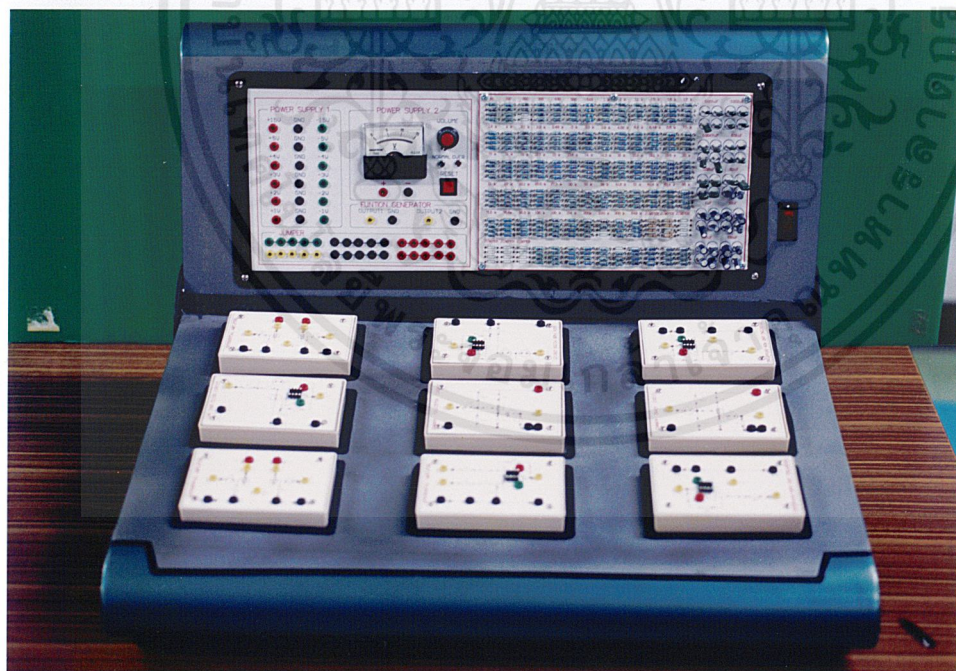
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 ชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว

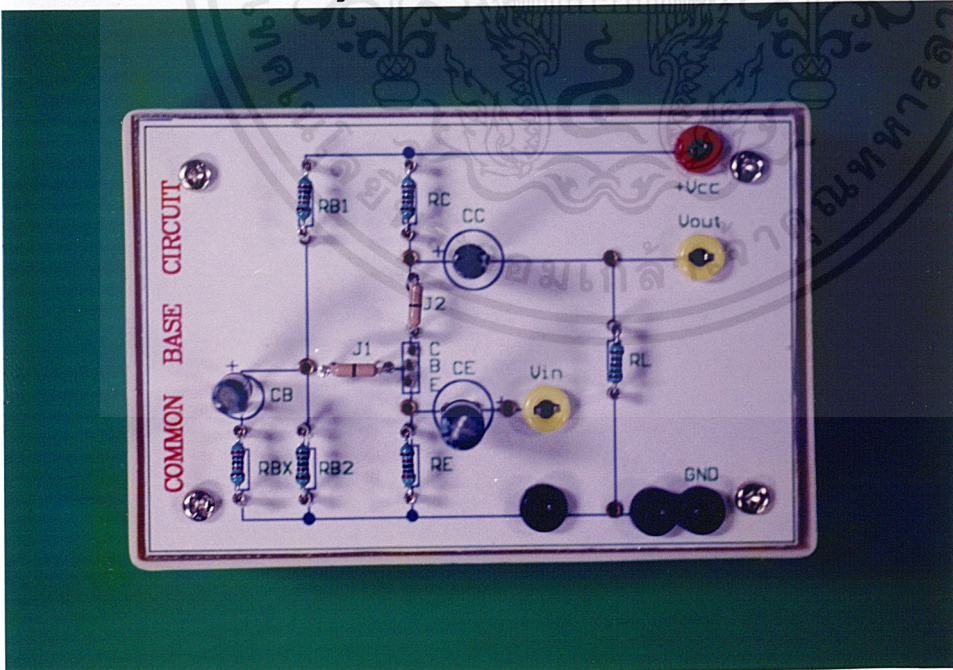


รูปที่ ก.2 ชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

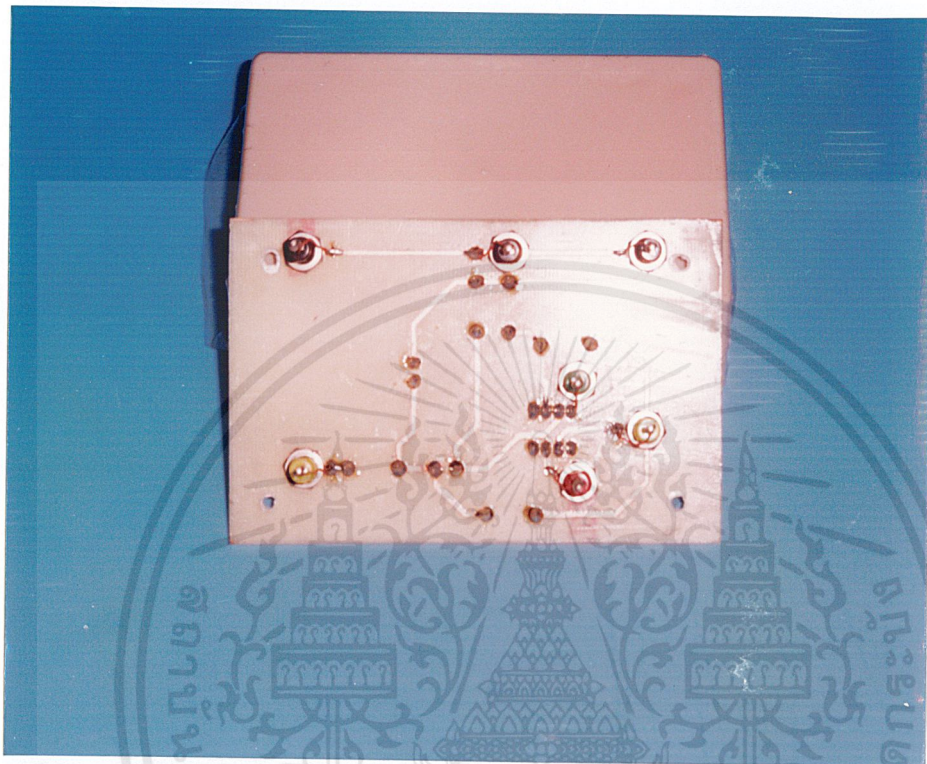


รูปที่ ก.3 ตู้เก็บบอร์ดทดลอง



รูปที่ ก.4 ตัวอย่างบอร์ดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



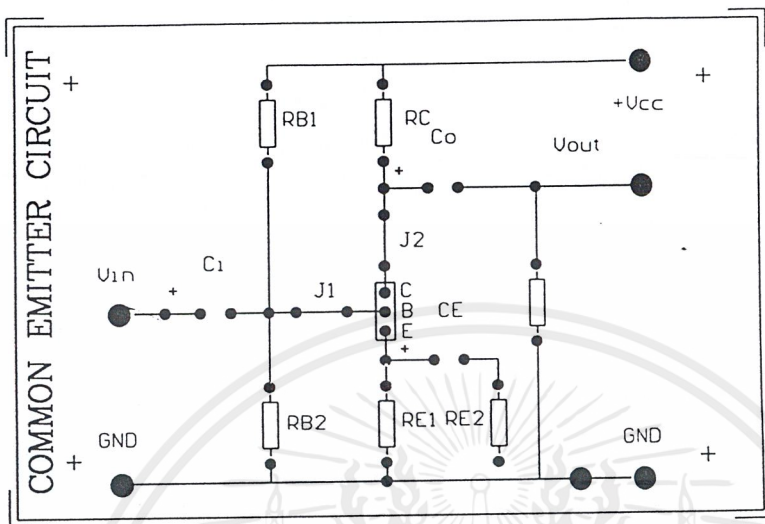
รูปที่ ก.5 ตัวอย่างแผ่นวงจรพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

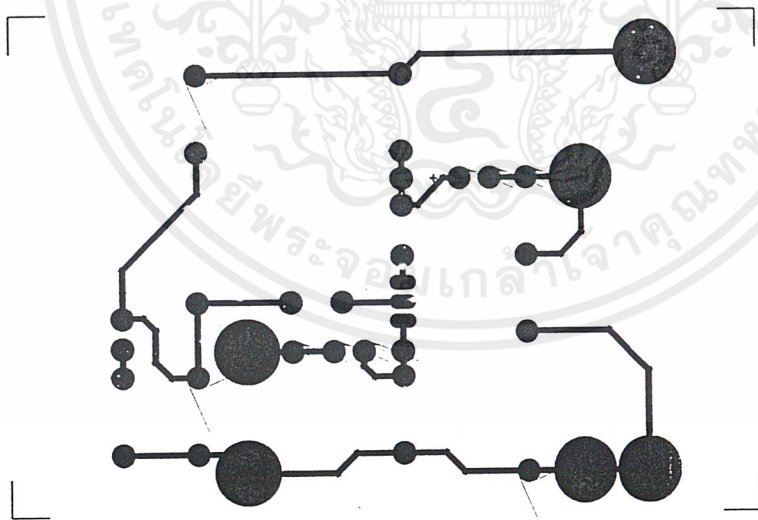


**ภาคผนวก ข**  
**วงจรและแผ่นวงจร**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

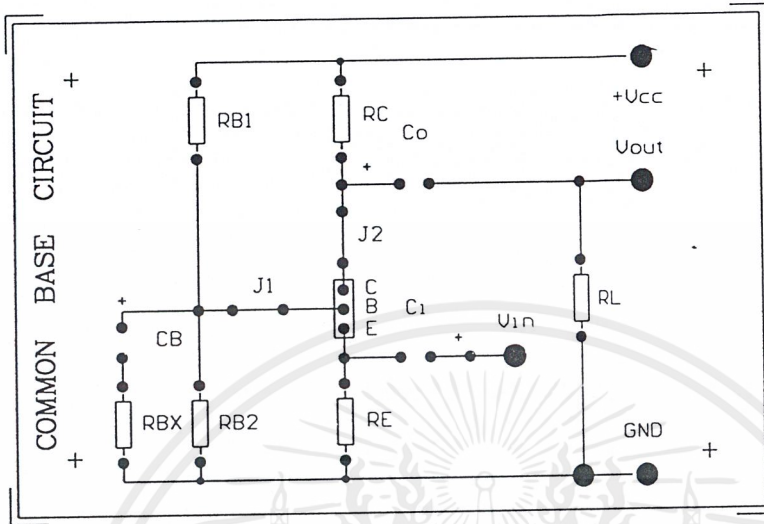


รูปที่ ข.1 ชุดทดลองวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

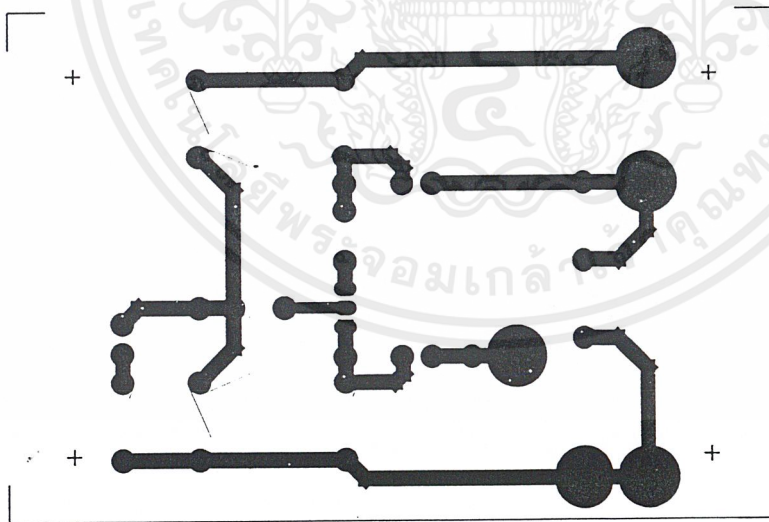


รูปที่ ข.2 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

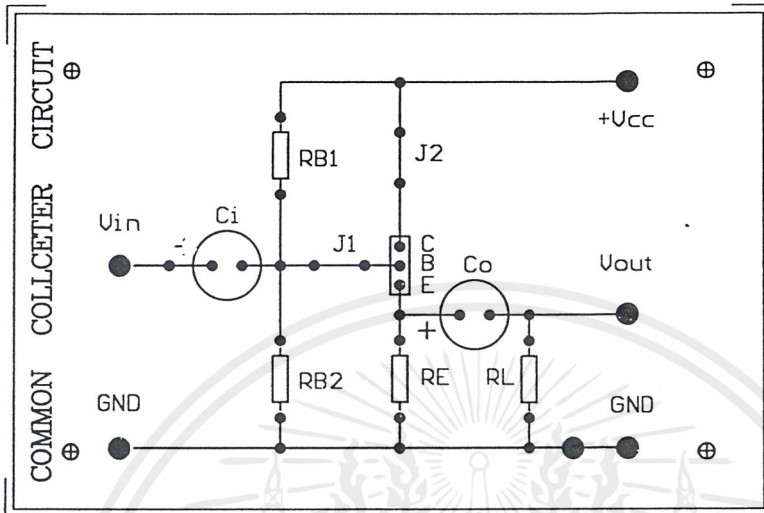


รูปที่ ข.3 ชุดทดลองวงจรขยายเบสร่วม

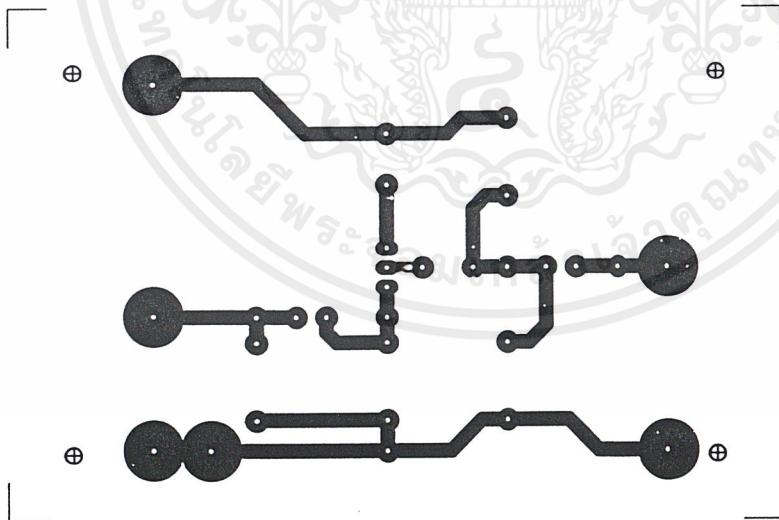


รูปที่ ข.4 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายเบสร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

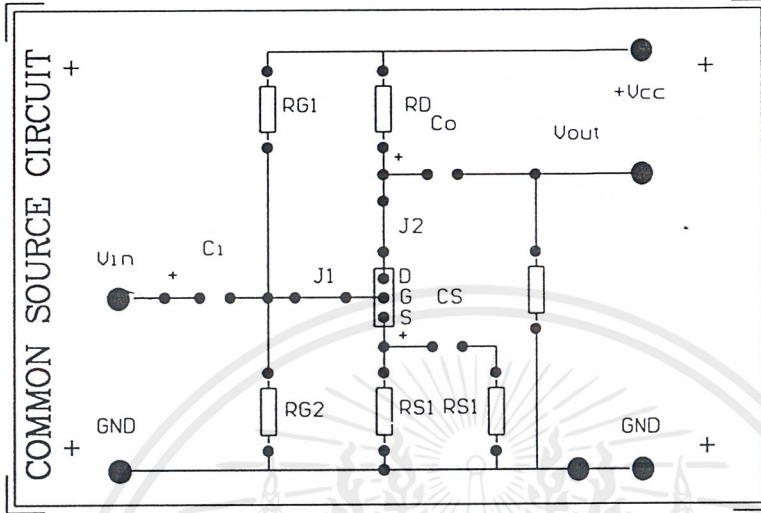


รูปที่ ข.5 ชุดทดลองวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม

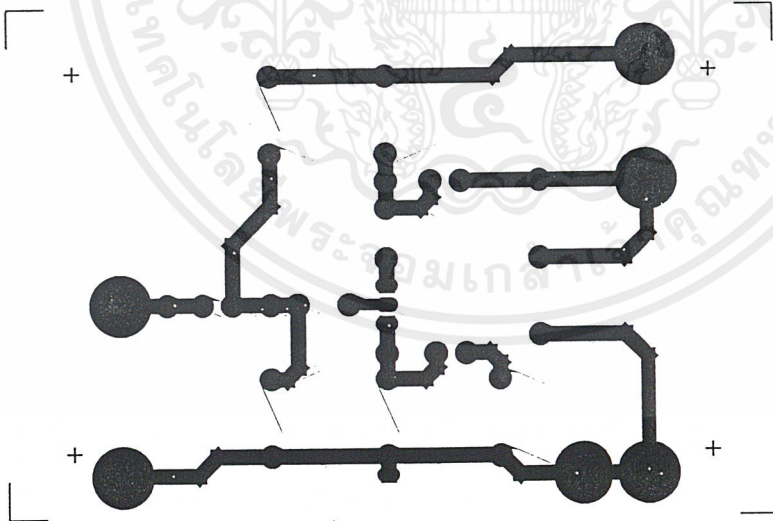


รูปที่ ข.6 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายคอลเลกเตอร์ร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

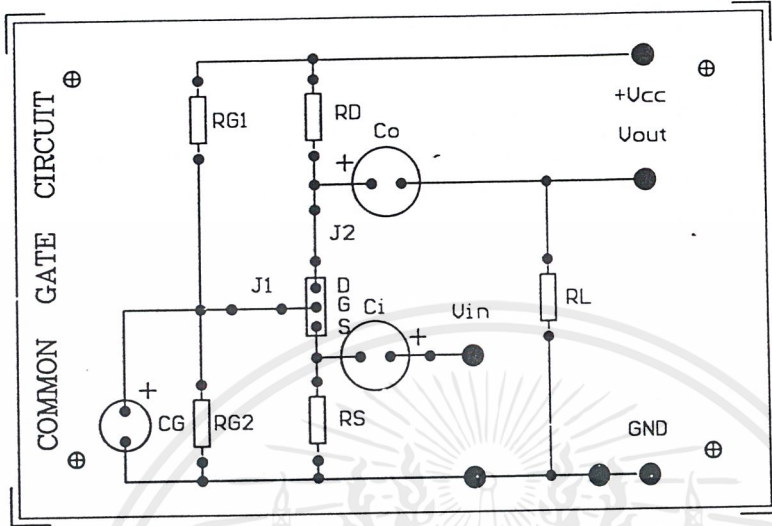


รูปที่ ข.7 ชุดทดลองวงจรขยายขอสร่วม

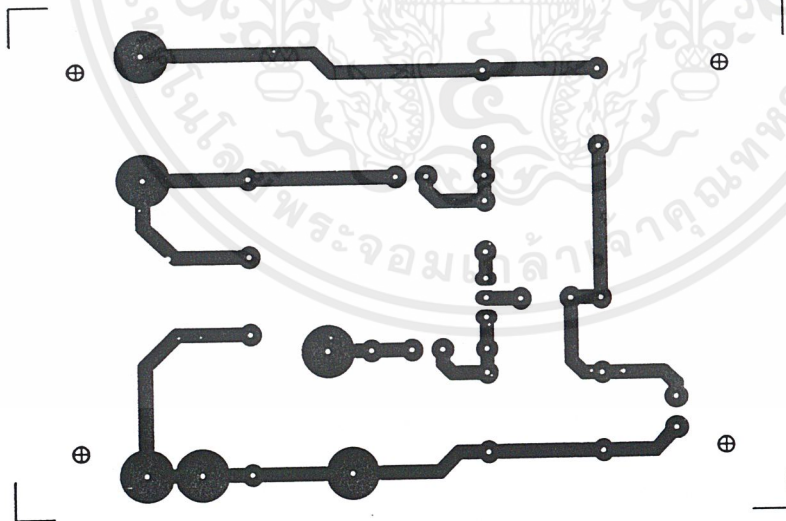


รูปที่ ข.8 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายขอสร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

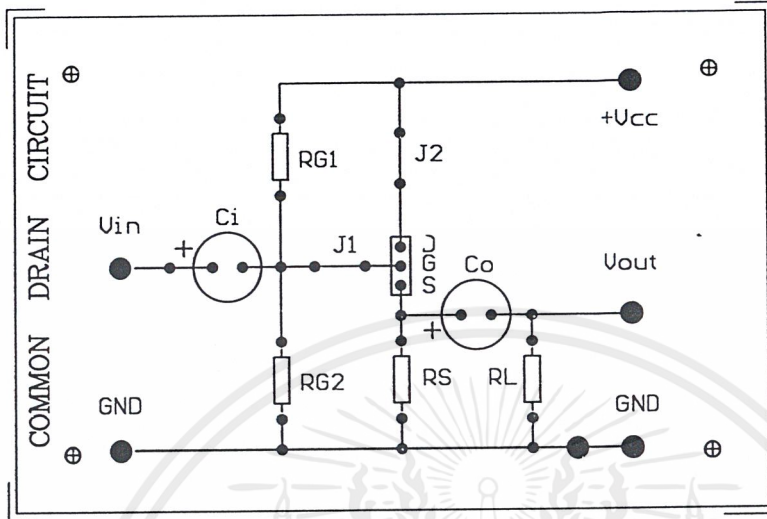


รูปที่ ข.9 ชุดทดลองวงจรขยายเกทร่วม

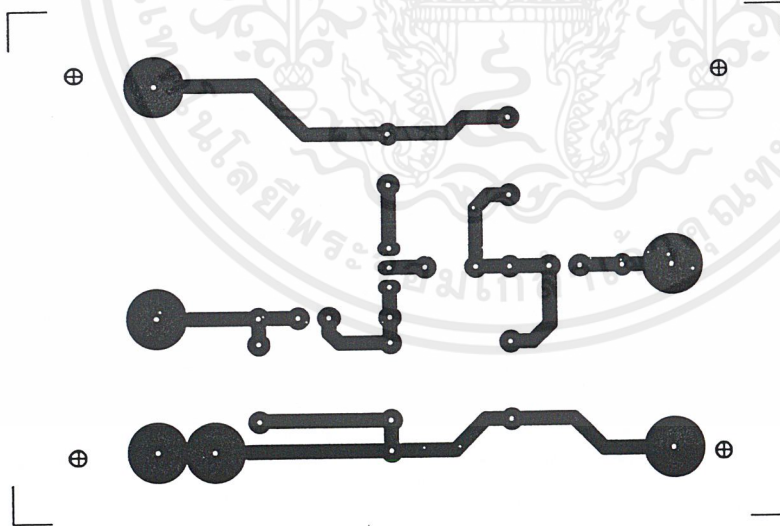


รูปที่ ข.10 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายเกทร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

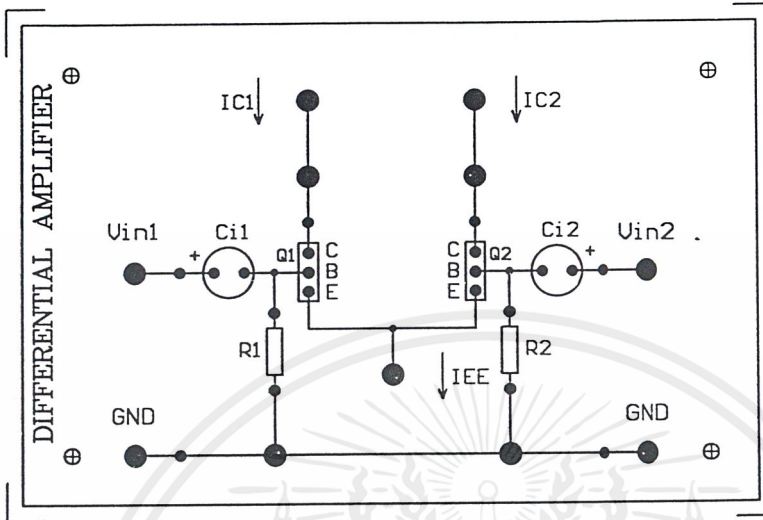


รูปที่ ข.11 ชุดทดลองวงจรขยายเดรนร่วม

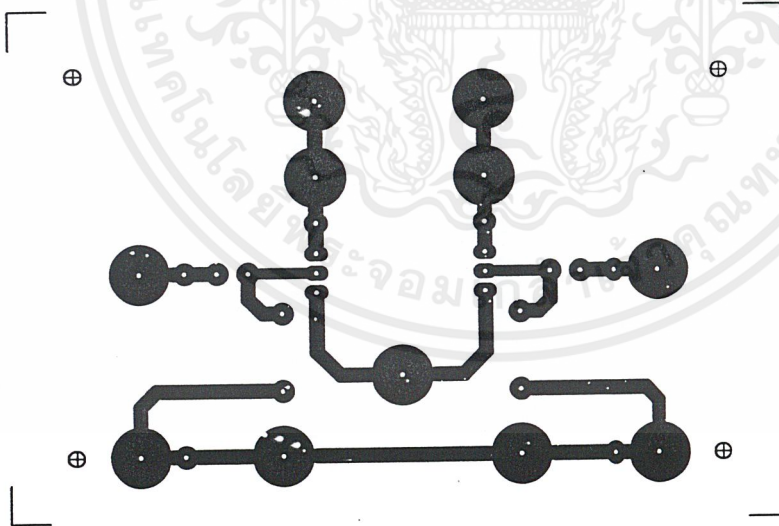


รูปที่ ข.12 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายเดรนร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

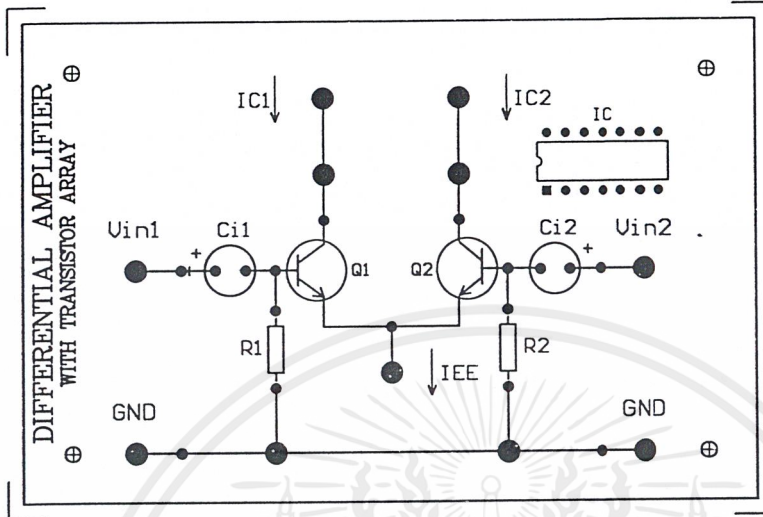


รูปที่ ข.13 ชุดทดลองวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์

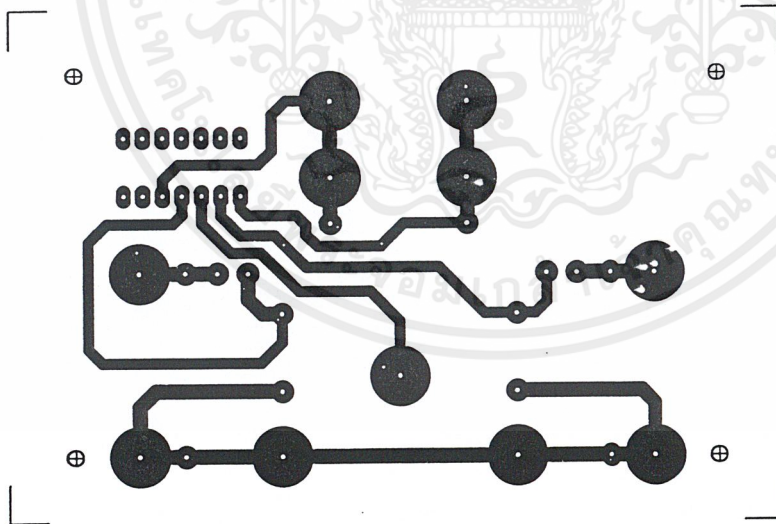


รูปที่ ข.14 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

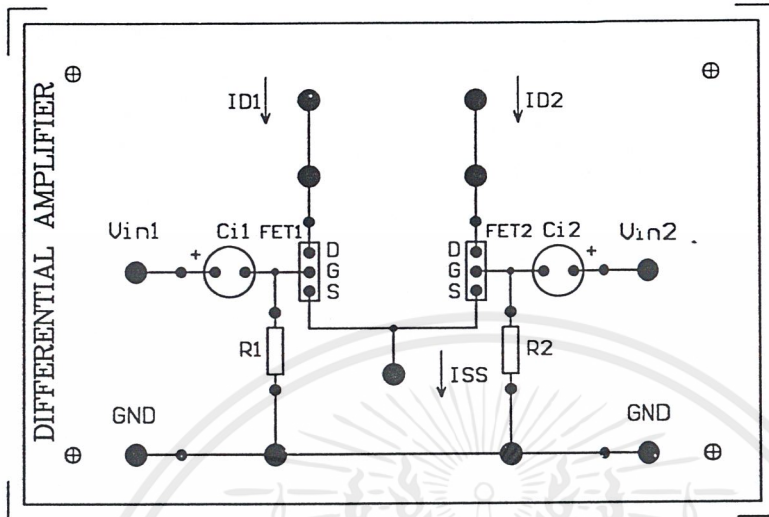


รูปที่ ข.15 ชุดทดลองวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

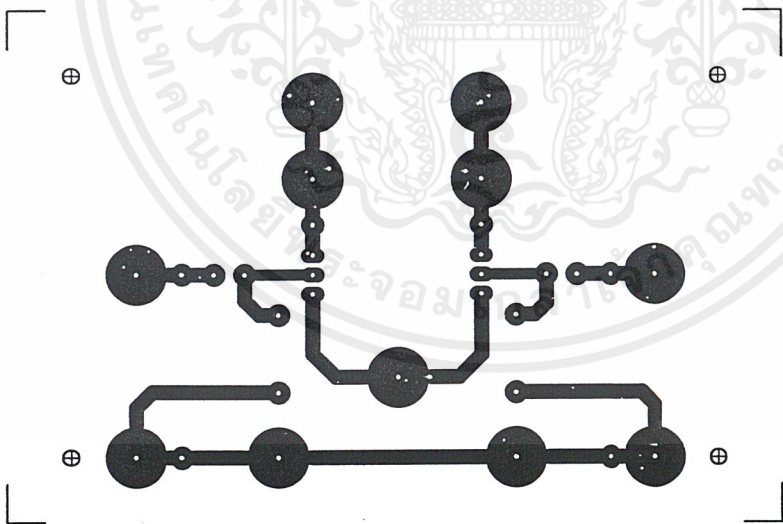


รูปที่ ข.16 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

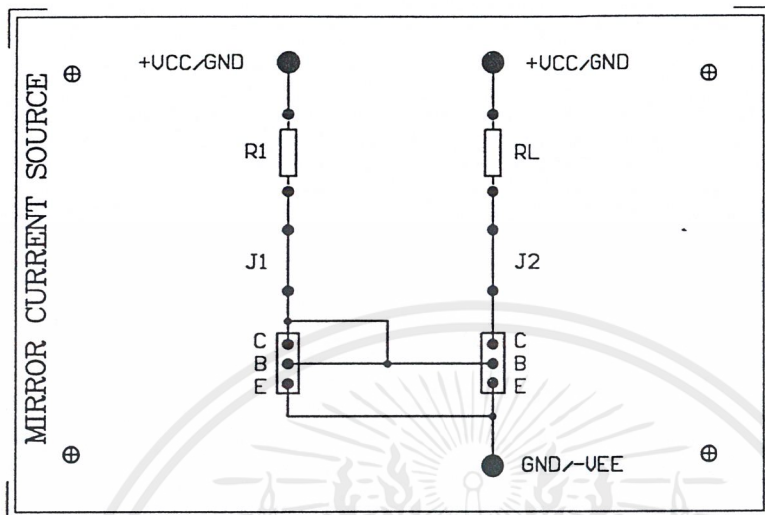


รูปที่ ข.17 ชุดทดลองวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

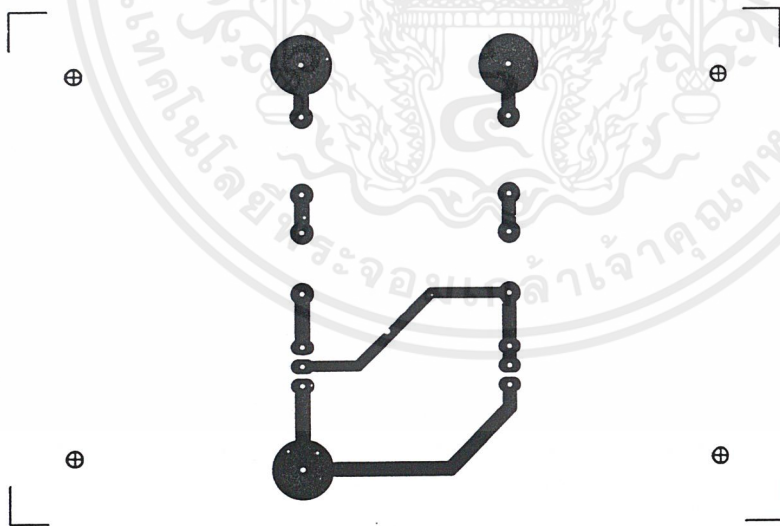


รูปที่ ข.18 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายผลต่างที่ใช้ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

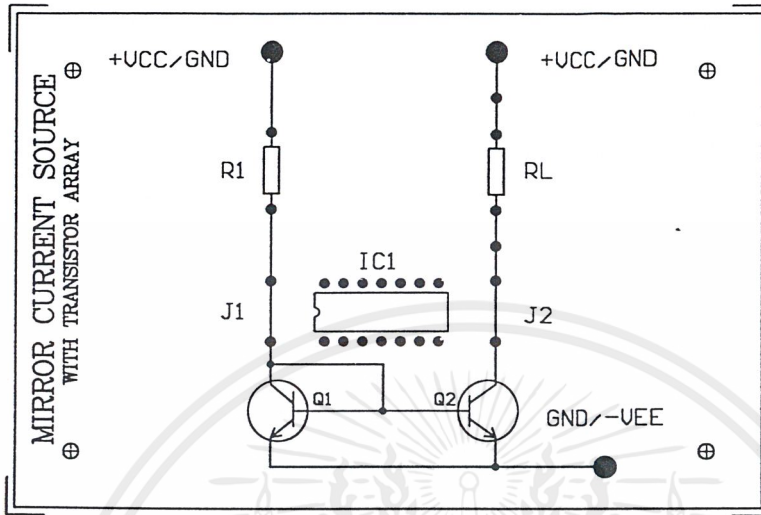


รูปที่ ข.19 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์

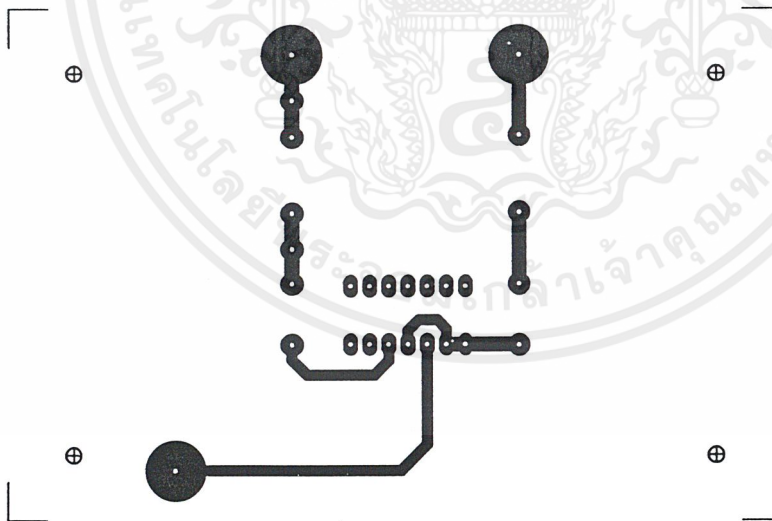


รูปที่ ข.20 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมเลออร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

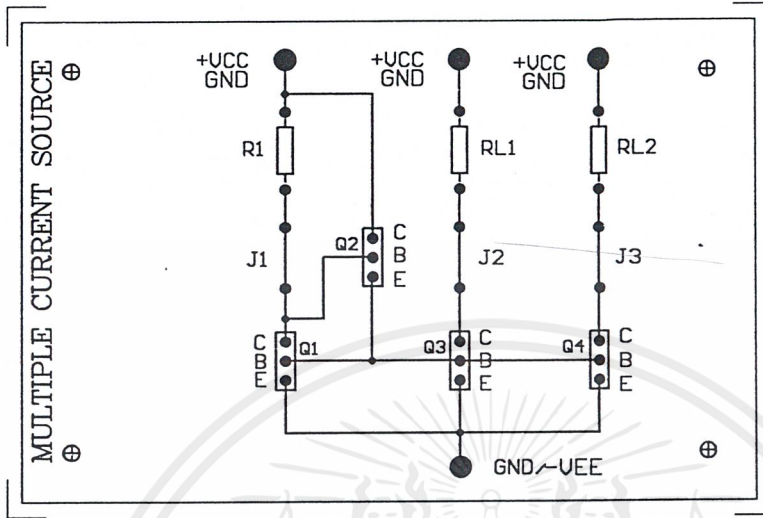


รูปที่ ข.21 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมโครที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

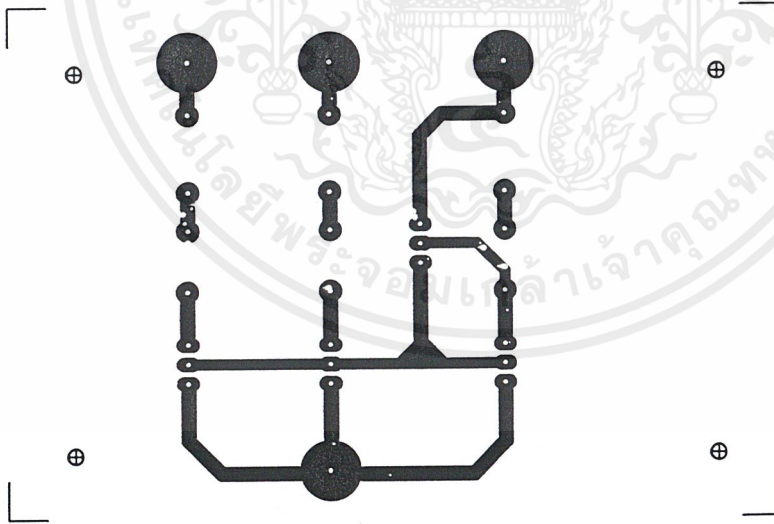


รูปที่ ข.22 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสไมโครที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

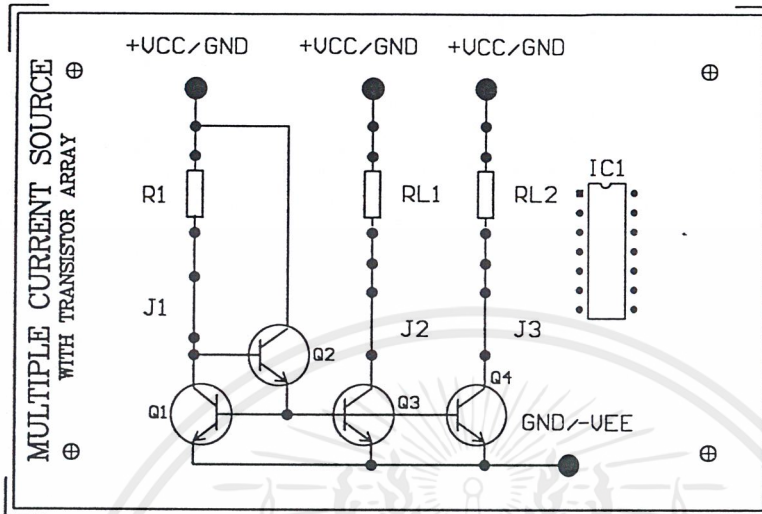


รูปที่ ข.23 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต

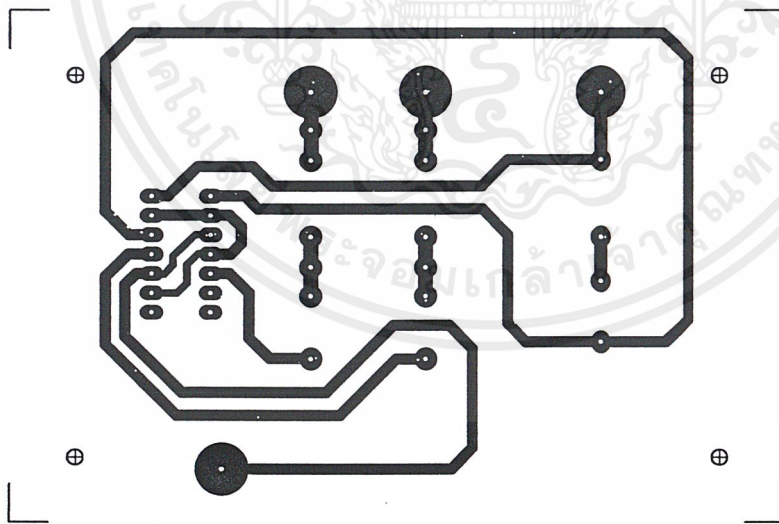


รูปที่ ข.24 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

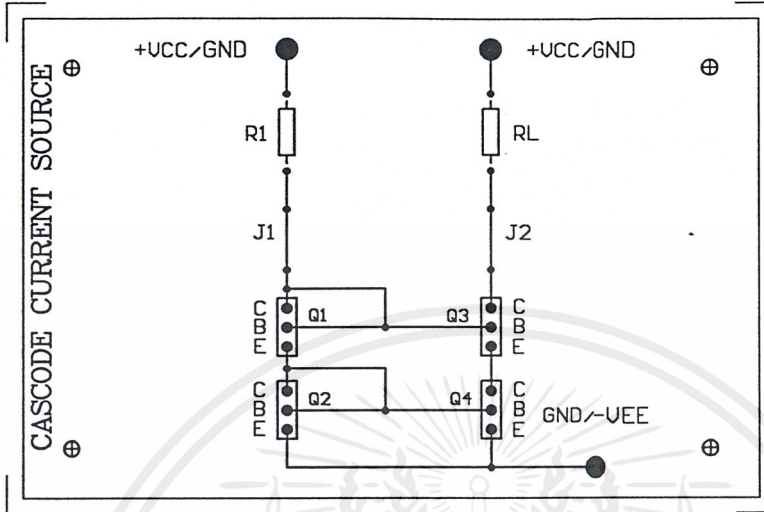


รูปที่ ข.25 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต  
โดยใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

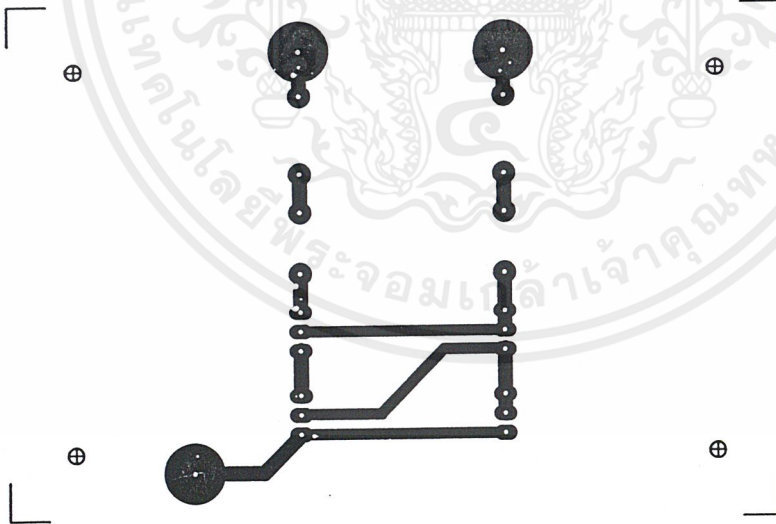


รูปที่ ข.26 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสที่มีเอาต์พุตมากกว่า 1 เอาต์พุต  
โดยใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

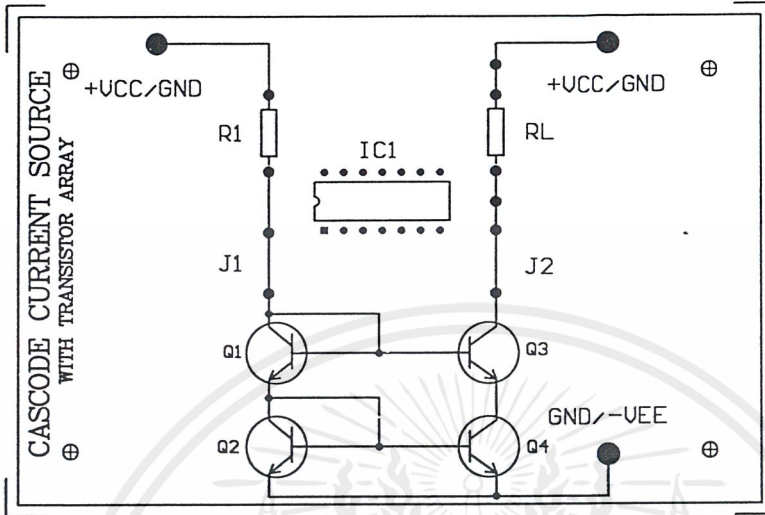


รูปที่ ข.27 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสแคสโคด

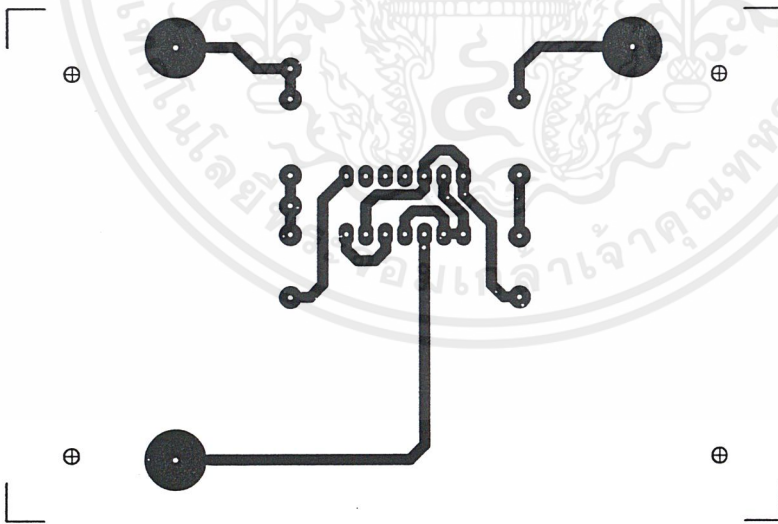


รูปที่ ข.28 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสแคสโคด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

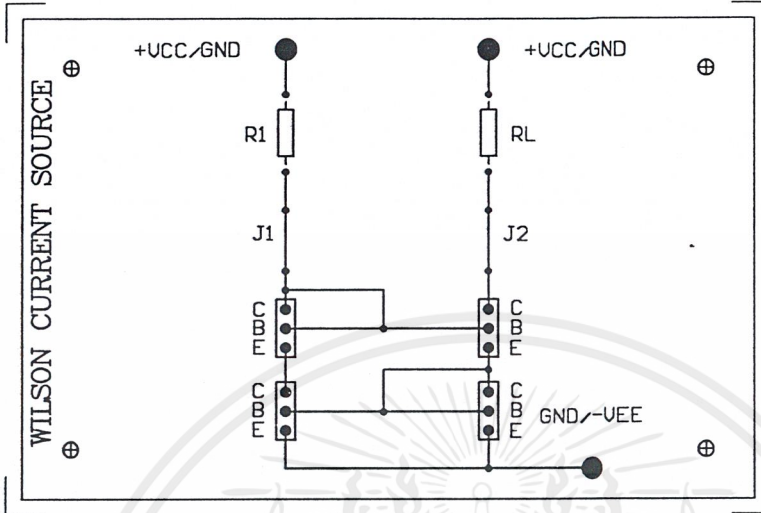


รูปที่ ข.29 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคดที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

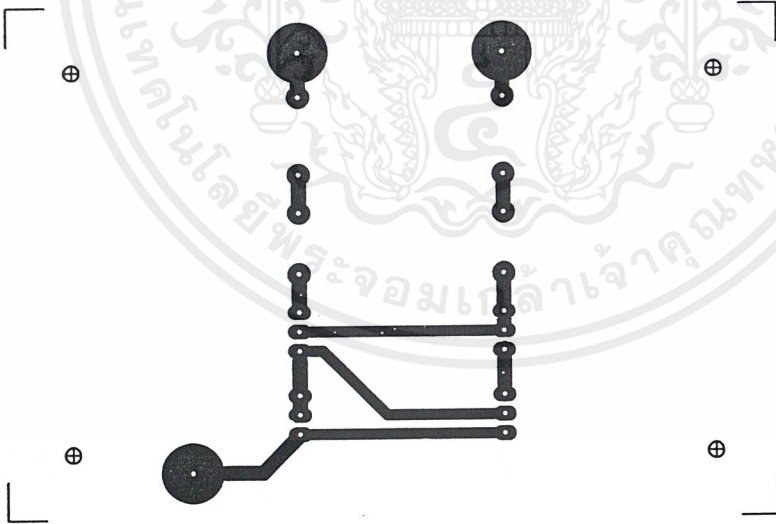


รูปที่ ข.30 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสคาสโคดที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

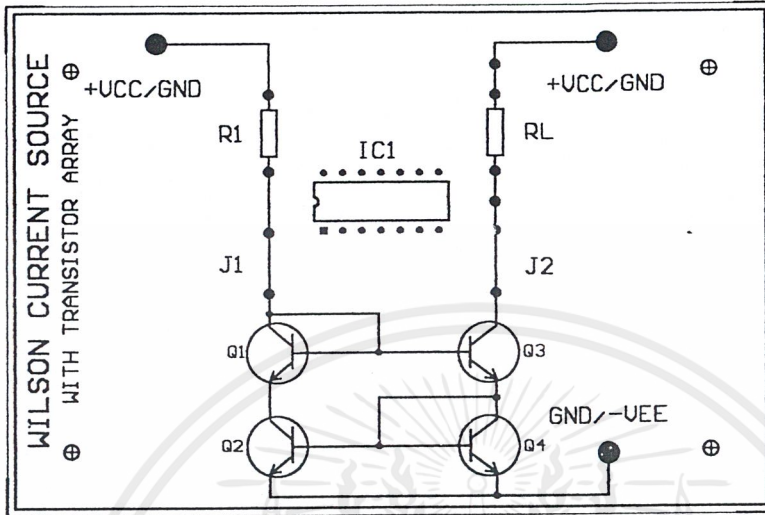


รูปที่ ข.31 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสเวิลสัน

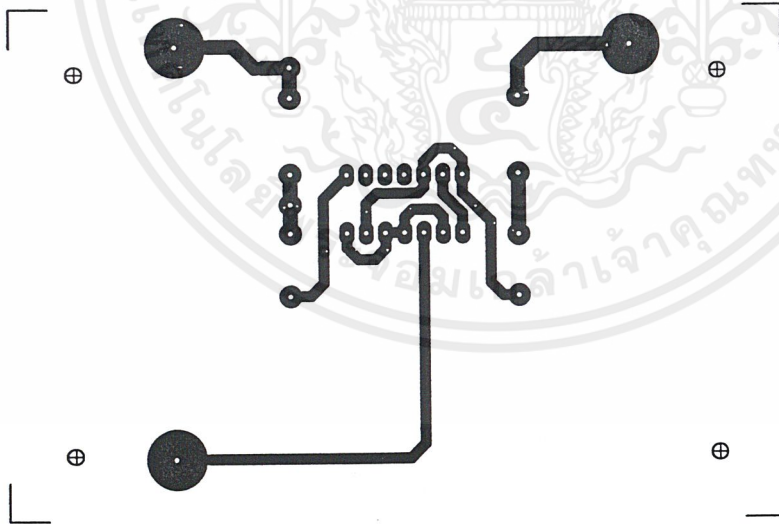


รูปที่ ข.32 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสเวิลสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

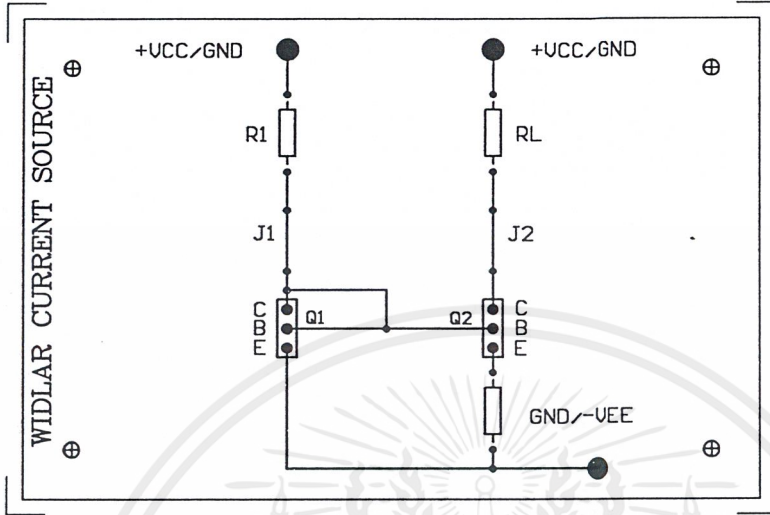


รูปที่ ข.33 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสไวลสันที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

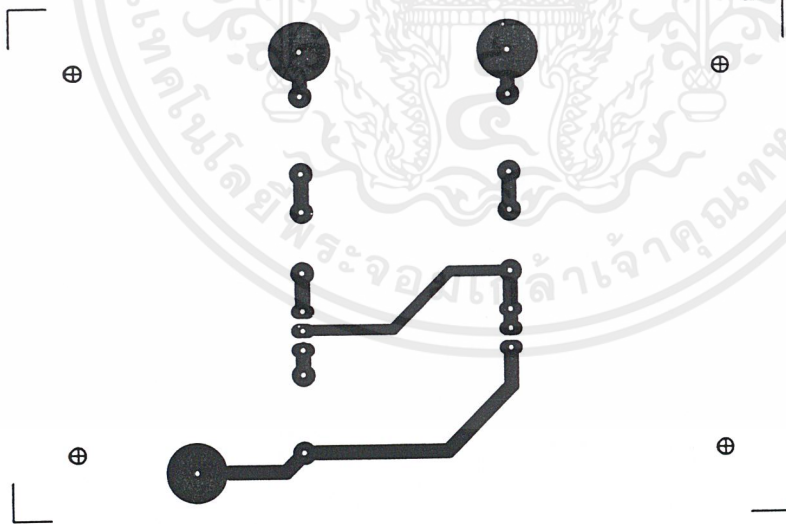


รูปที่ ข.34 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสไวลสันที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

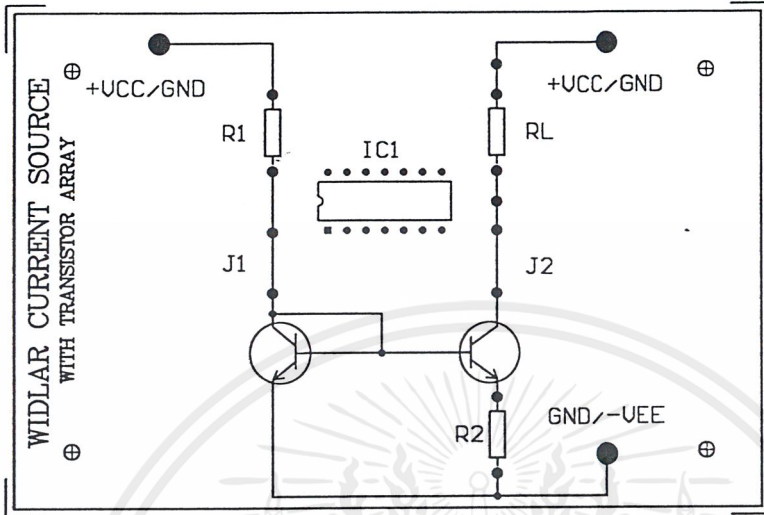


รูปที่ ข.35 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสตัวตาร

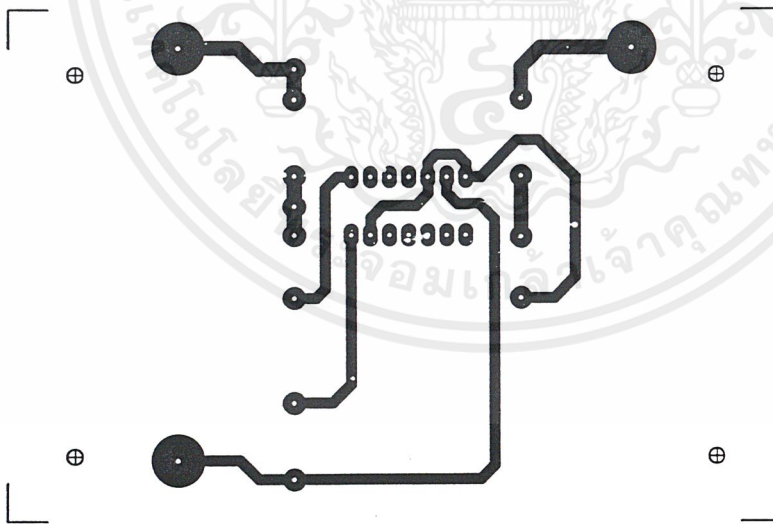


รูปที่ ข.36 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสตัวตาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

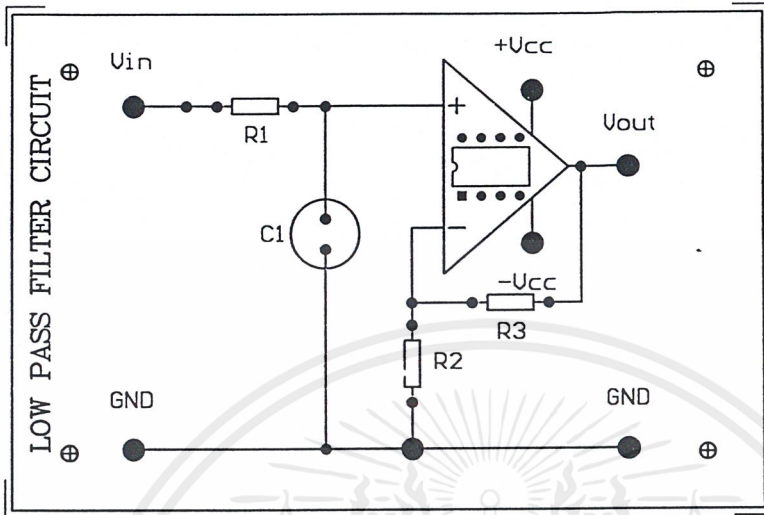


รูปที่ ข.37 ชุดทดลองวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

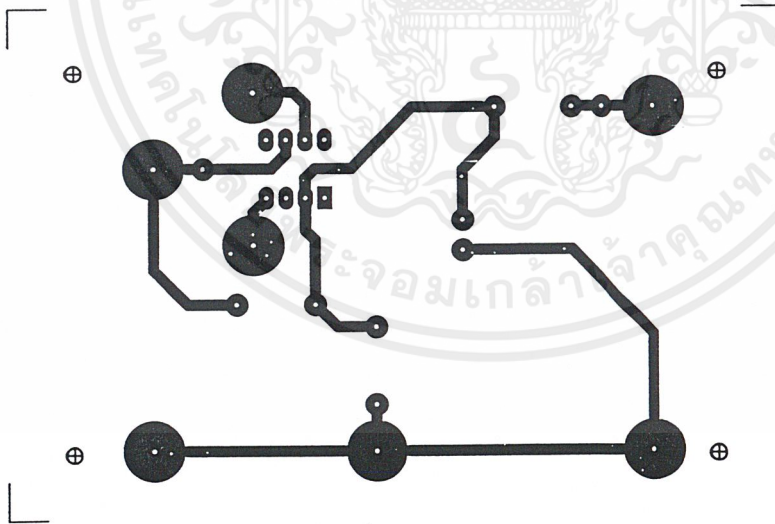


รูปที่ ข.38 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรแหล่งจ่ายกระแสวิดลาร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์อาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

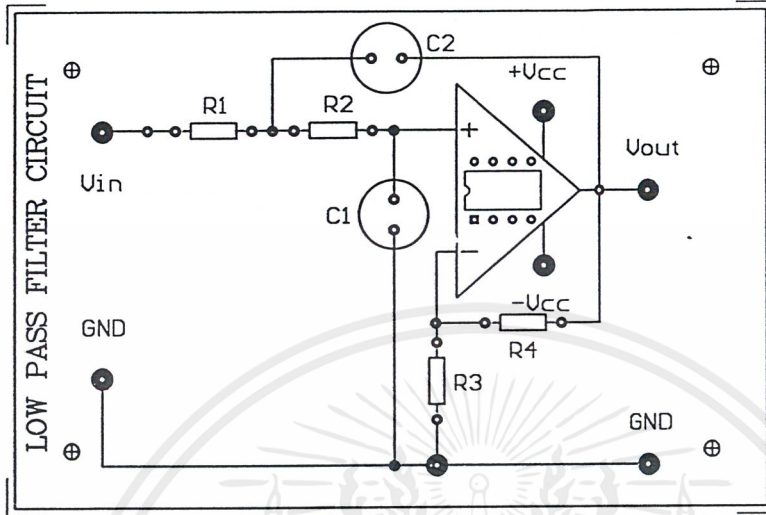


รูปที่ ข.39 ชุดทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1

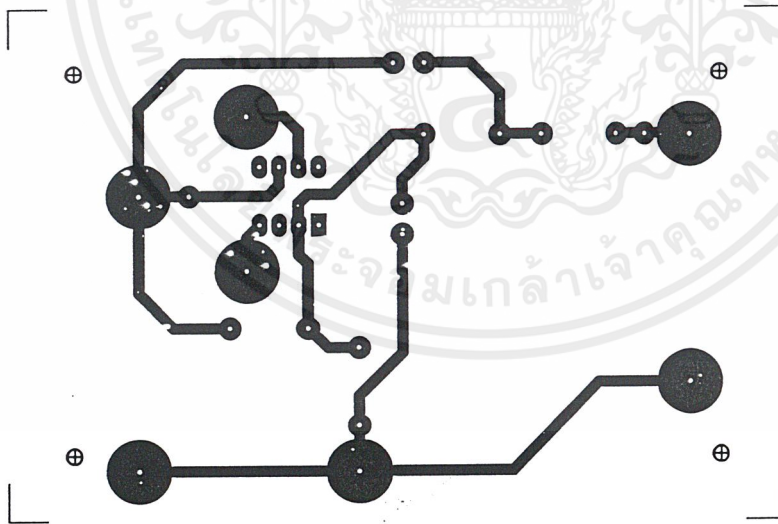


รูปที่ ข.40 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

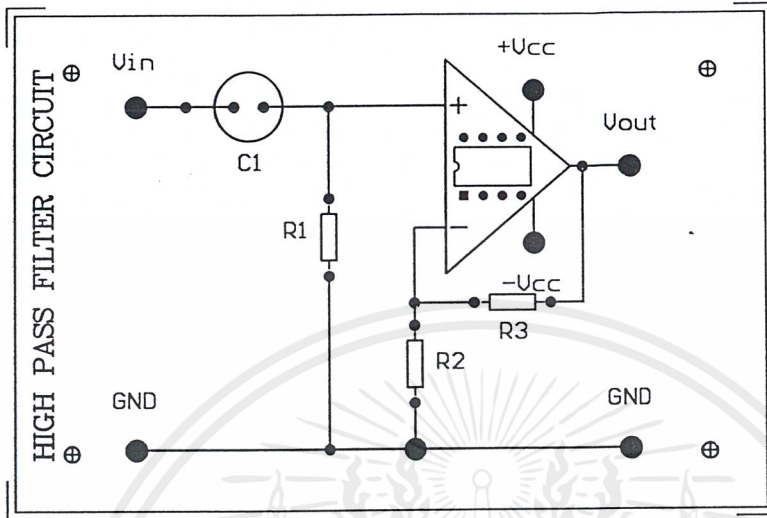


รูปที่ ข.41 ชุดทดลองวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2

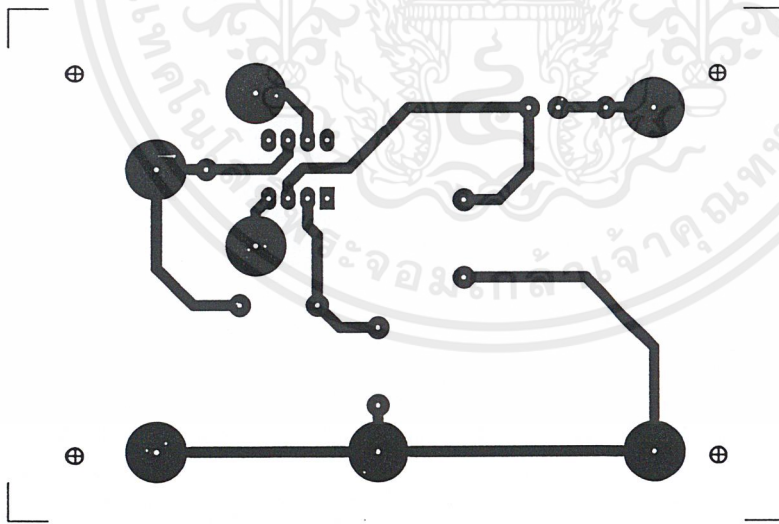


รูปที่ ข.42 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

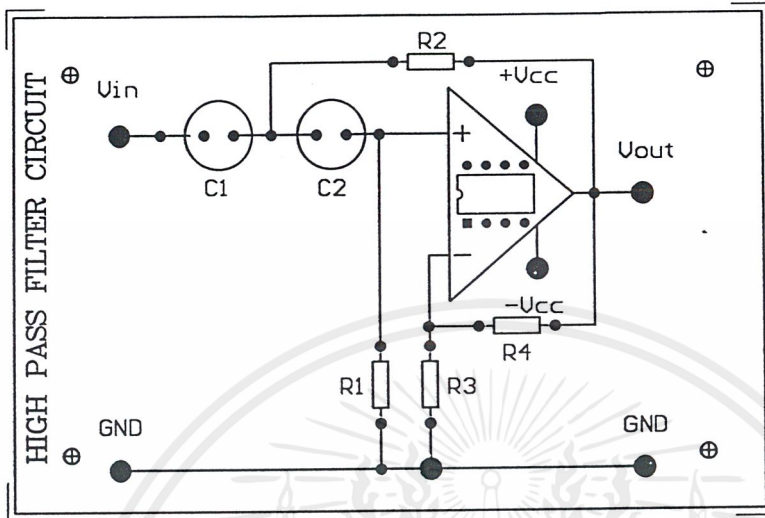


รูปที่ ข.43 ชุดทดลองวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1

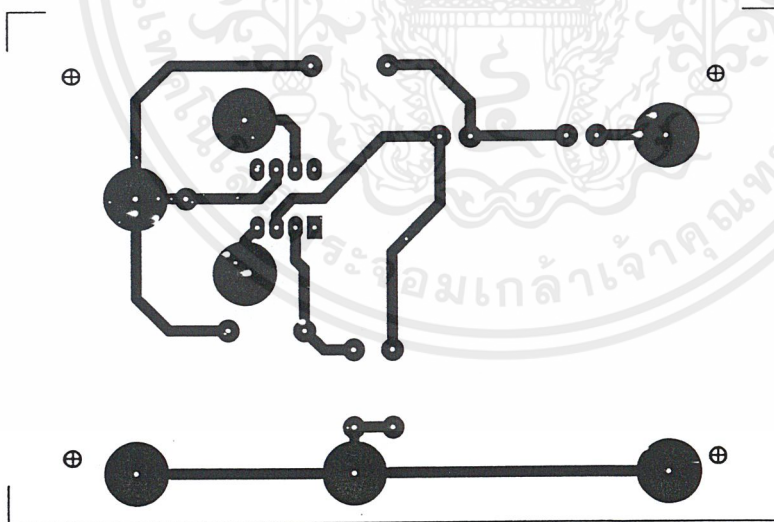


รูปที่ ข.44 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

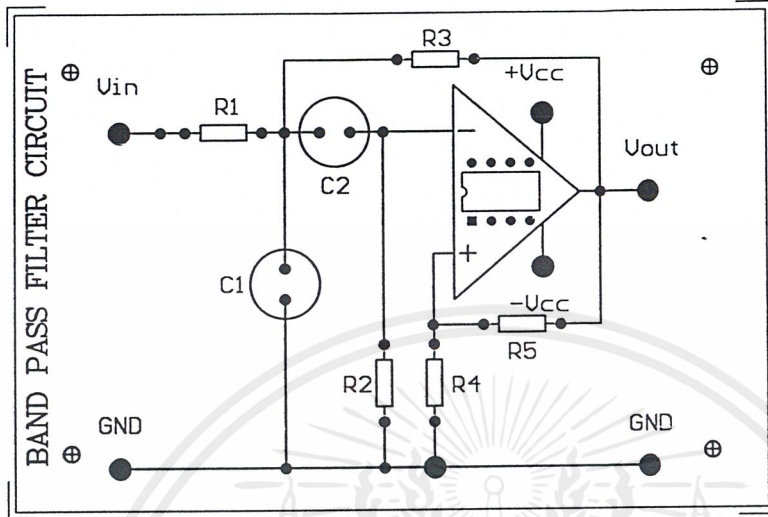


รูปที่ ข.45 ชุดทดลองวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2

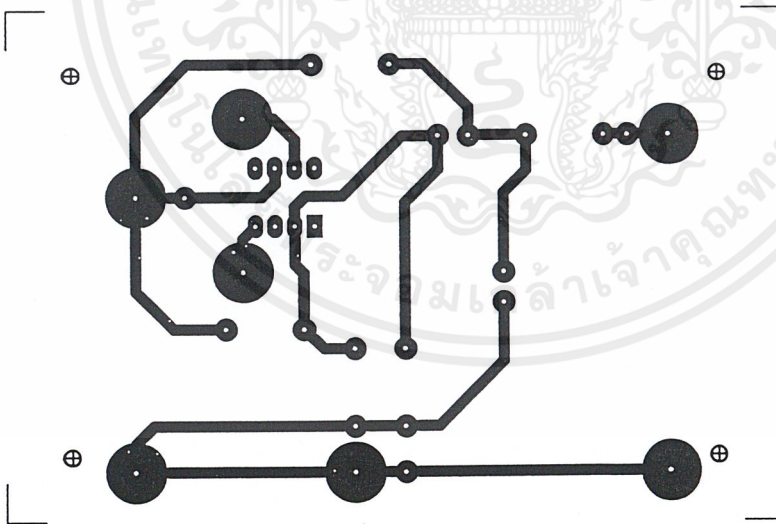


รูปที่ ข.46 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองความถี่สูงอันดับ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

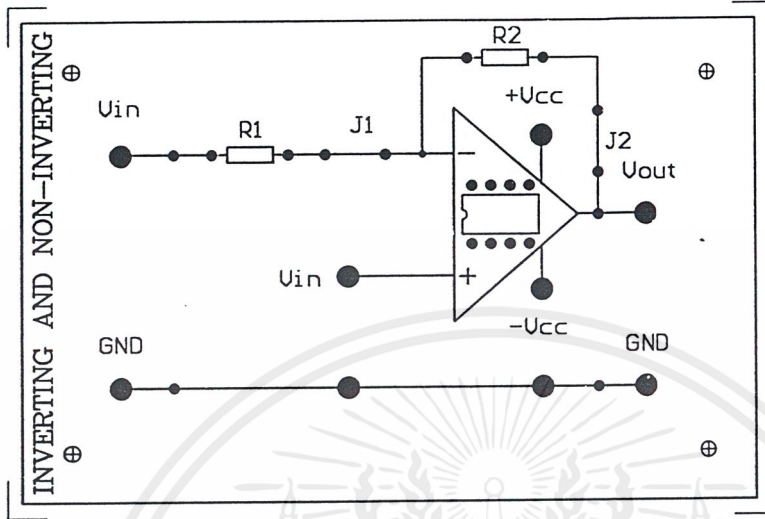


รูปที่ ข.47 ชุดทดลองวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่

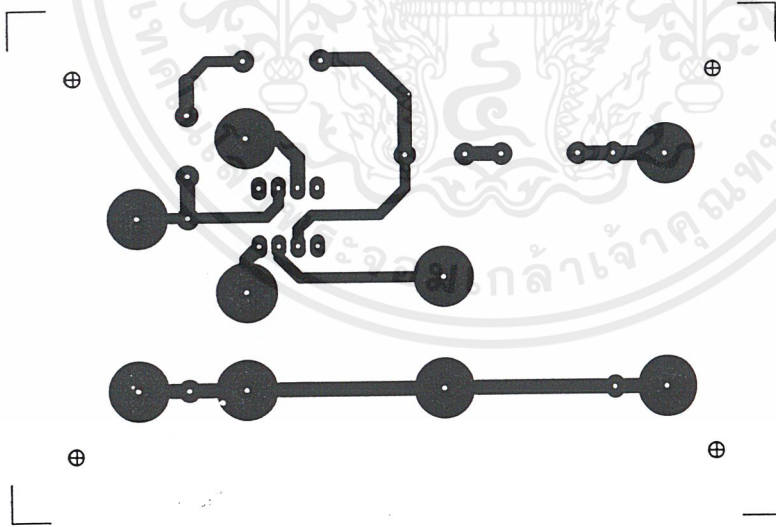


รูปที่ ข.48 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรกรองเฉพาะแถบความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

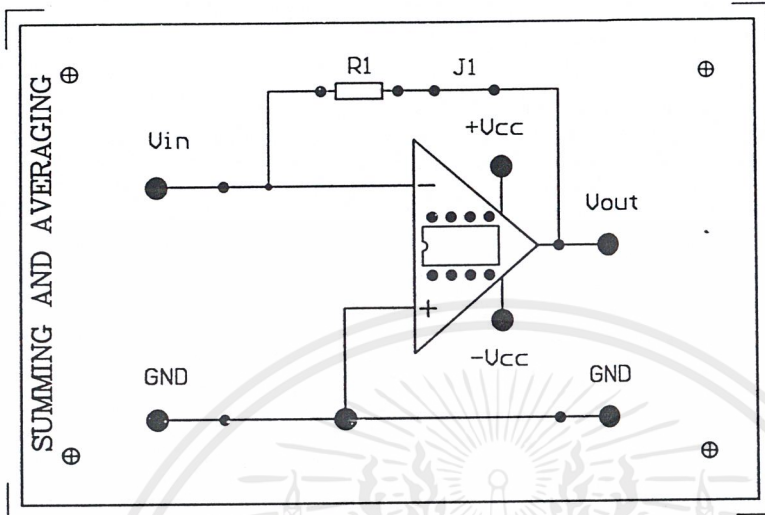


รูปที่ ข.49 ชุดทดลองวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟส

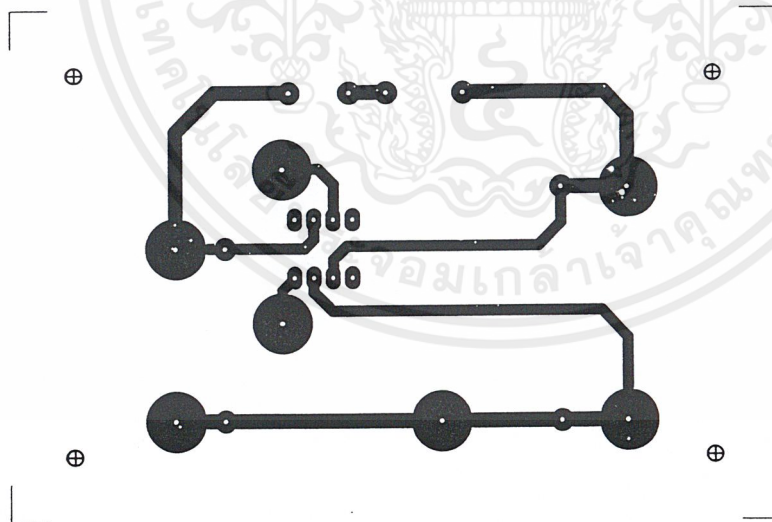


รูปที่ ข.50 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายออปแอมป์ชนิดป้อนกลับแบบกลับเฟสและไม่กลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

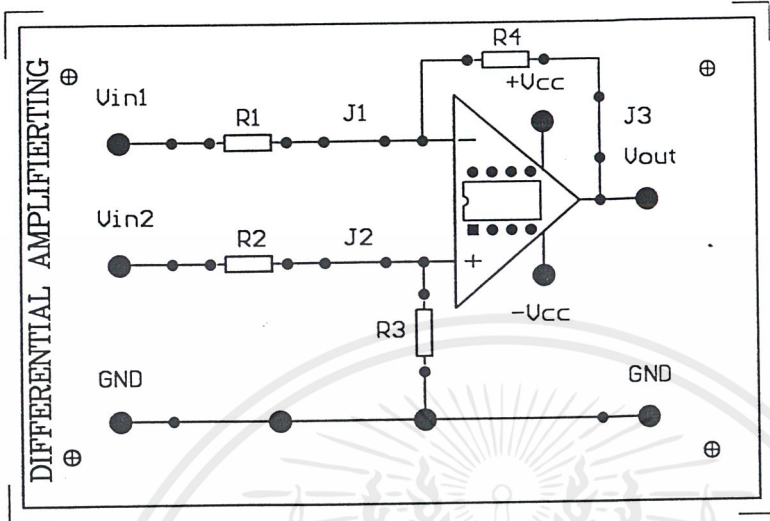


รูปที่ ข.51 ชุดทดลองวงจรผลรวมและวงจรค่าเฉลี่ย

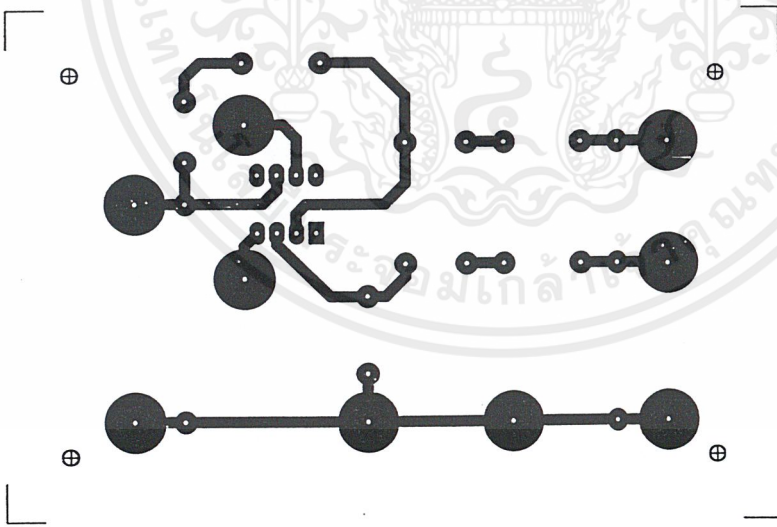


รูปที่ ข.52 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรผลรวมและวงจรค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.53 ชุดทดลองวงจรขยายผลต่างโดยใช้อปแอมป์



รูปที่ ข.54 แผ่นวงจรพิมพ์ของวงจรขยายผลต่างโดยใช้อปแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการอุปกรณ์

ชื่ออุปกรณ์	จำนวน(ตัว)
IC LM741	2
IC LM3046	1
ทรานส์ซิสเตอร์เบอร์ 2N3904	4
FET เบอร์ 2N3819	4
R 50 Ω	1
R 100 Ω	2
R 250 Ω	1
R 300 Ω	1
R 400 Ω	1
R 500 Ω	1
R 549 Ω	2
R 820 Ω	1
R 1 kΩ	7
R 1.1 kΩ	2
R 1.2 kΩ	1
R 1.5 kΩ	1
R 1.6 kΩ	1
R 1.7 kΩ	1
R 1.8 kΩ	1
R 2 kΩ	1
R 2.1 kΩ	1
R 2.2 kΩ	1
R 2.49 kΩ	1
R 3 kΩ	1
R 3.3 kΩ	1
R 3.9 kΩ	1
R 4.32 kΩ	1
R 4.7 kΩ	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่ออุปกรณ์	จำนวน(ตัว)	
R	6.2 kΩ	1
R	6.49 kΩ	1
R	6.8 kΩ	1
R	7.5 kΩ	1
R	10 kΩ	2
R	11 kΩ	1
R	12 kΩ	1
R	12.3 kΩ	1
R	12.7 kΩ	1
R	13 kΩ	1
R	13.6 kΩ	1
R	14 kΩ	1
R	14.3 kΩ	1
R	15 kΩ	1
R	16 kΩ	2
R	16.2 kΩ	1
R	19.1 kΩ	1
R	19.6 kΩ	1
R	20 kΩ	1
R	21 kΩ	1
R	22 kΩ	3
R	23 kΩ	1
R	22.1 kΩ	1
R	25.5 kΩ	1
R	27.5 kΩ	1
R	30 kΩ	1
R	32 kΩ	2
R	33 kΩ	2
R	39 kΩ	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่ออุปกรณ์	จำนวน(ตัว)
R 41.2 k $\Omega$	2
R 51 k $\Omega$	2
R 57.6 k $\Omega$	1
R 60.4 k $\Omega$	2
R 63.4 k $\Omega$	1
R 68 k $\Omega$	1
R 71.5 k $\Omega$	2
R 76.8 k $\Omega$	2
R 95.3 k $\Omega$	1
R 100 k $\Omega$	4
R 154 k $\Omega$	2
R 200 k $\Omega$	2
R 240 k $\Omega$	2
R 300 k $\Omega$	1
R 500 k $\Omega$	1
R 649 k $\Omega$	1
R 1 M $\Omega$	1
R 2 M $\Omega$	1
C 1 nF	2
C 2 nF	2
C 4.7 nF	2
C 0.01 $\mu$ F	2
C 0.02 $\mu$ F	2
C 0.1 $\mu$ F	4
C 1 $\mu$ F	3
C 10 $\mu$ F	3
C 100 $\mu$ F	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## N-Channel JFET

### PRODUCT SUMMARY

$V_{GS(off)}$ (V)	$V_{(BR)SS}$ MIN (V)	$g_{fs}$ MIN (MS)	$I_{DSS}$ MIN (MA)
$\leq -8$	-25	2	2

### FEATURES

- Excellent High-Frequency Gain: Gps 11 dB @ 400 MHz
- Very Low Noise: 3 dB @ 400 MHz
- Very Low Distortion
- High ac/dc Switch Off-Isolation
- High Gain:  $A_V = 60$  @ 100  $\mu$ A

### BENEFITS

- Wideband High Gain
- Very High System Sensitivity
- High Quality of Amplification
- High-Speed Switching Capability
- High Low-Level Signal Amplification

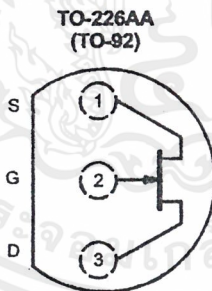
### APPLICATIONS

- High-Frequency Amplifier/Mixer
- Oscillator
- Sample-and-Hold
- Very Low Capacitance Switches

### DESCRIPTION

The 2N3819 is a low-cost, all-purpose JFET which offers good performance at mid-to-high frequencies. It features low noise and leakage and guarantees high gain at 100 MHz.

Its TO-226AA (TO-92) package is compatible with various tape-and-reel options for automated assembly (see Packaging Information). For similar products in TO-206AF (TO-72) and TO-236 (SOT-23) packages, see the 2N4416/2N4416A/SST4416 data sheet.



Top View

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Gate-Source/Gate-Drain Voltage .....	-25 V	Lead Temperature ( $1/16$ " from case for 10 sec.) .....	300°C
Forward Gate Current .....	10 mA	Power Dissipation <sup>A</sup> .....	350 mW
Storage Temperature .....	-55 to 150°C	Notes	
Operating Junction Temperature .....	-55 to 150°C	A. Derate 2.8 mW/°C above 25°C	

Updates to this data sheet may be obtained via facsimile by calling Siliconix FaxBack, 1-408-970-5600. Please request FaxBack document #70238.

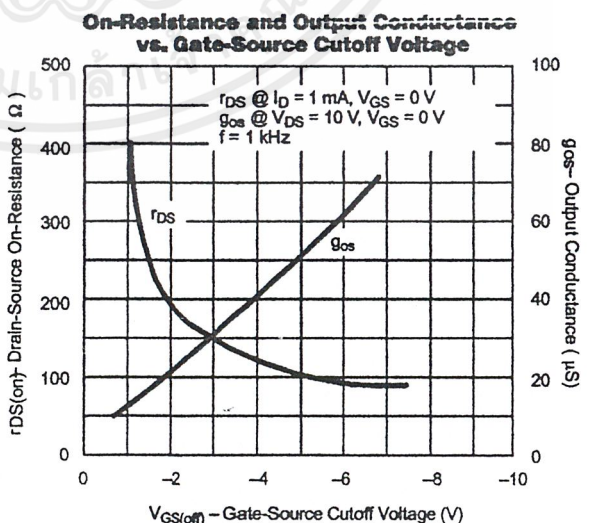
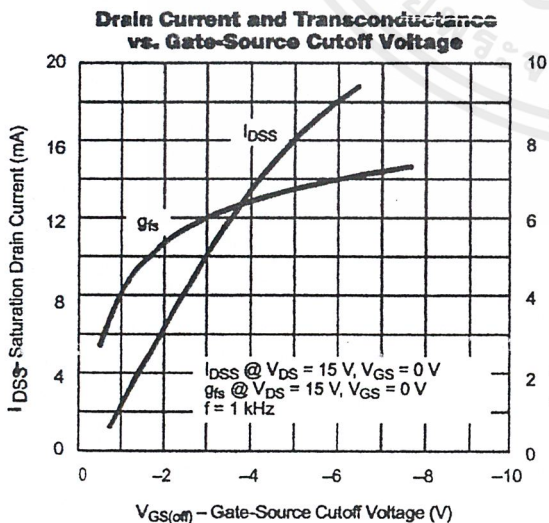
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS							
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	LIMITS			UNIT	
			MIN	TYP <sup>B</sup>	MAX		
<b>STATIC</b>							
Gate-Source Breakdown Voltage	$V_{(BR)GS}$	$I_G = -1 \mu A, V_{DS} = 0 V$	-25	-35		V	
Gate-Source Cutoff Voltage	$V_{GS(off)}$	$V_{DS} = 15 V, I_D = 2 nA$		-3	-8	V	
Saturation Drain Current <sup>C</sup>	$I_{DSS}$	$V_{DS} = 15 V, V_{GS} = 0 V$	2	10	20	mA	
Gate Reverse Current	$I_{GSS}$	$V_{GS} = -15 V, V_{DS} = 0 V$		-0.002	-2	nA	
		$T_A = 100^\circ C$		-0.002	-2	$\mu A$	
Gate Operating Current <sup>D</sup>	$I_G$	$V_{DG} = 10 V, I_D = 1 mA$		-20		pA	
Drain Cutoff Current	$I_{D(off)}$	$V_{DS} = 10 V, V_{GS} = -8 V$		2			
Drain-Source On-Resistance	$r_{DS(on)}$	$V_{GS} = 0 V, I_D = 1 mA$		150		$\Omega$	
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	$V_{DS} = 15 V, I_D = 200 \mu A$	-0.5	-2.5	-7.5	V	
Gate-Source Forward Voltage	$V_{GS(F)}$	$I_G = 1 mA, V_{DS} = 0 V$		0.7			
<b>DYNAMIC</b>							
Common-Source Forward Transconductance <sup>D</sup>	$g_{fs}$	$V_{DS} = 15 V, V_{GS} = 0 V$	$f = 1 kHz$	2	5.5	6.5	mS
			$f = 100 MHz$	1.6	5.5		
Common-Source Output Conductance <sup>D</sup>	$g_{os}$		$f = 1 kHz$		25	50	$\mu S$
Common-Source Input Capacitance	$C_{iss}$	$V_{DS} = 15 V, V_{GS} = 0 V, f = 1 MHz$			2.2	8	pF
Common-Source Reverse Transfer Capacitance	$C_{rss}$				0.7	4	
Equivalent Input Noise Voltage <sup>D</sup>	$\bar{e}_n$	$V_{DS} = 10 V, V_{GS} = 0 V, f = 100 Hz$		6			$nV/\sqrt{Hz}$

- Notes  
 A.  $T_A = 25^\circ C$  unless otherwise noted.  
 B. Typical values are for DESIGN AID ONLY, not guaranteed nor subject to production testing.  
 C. Pulse test:  $PW \leq 300 \mu s$ , duty cycle  $\leq 2\%$ .  
 D. This parameter not registered with JEDEC.

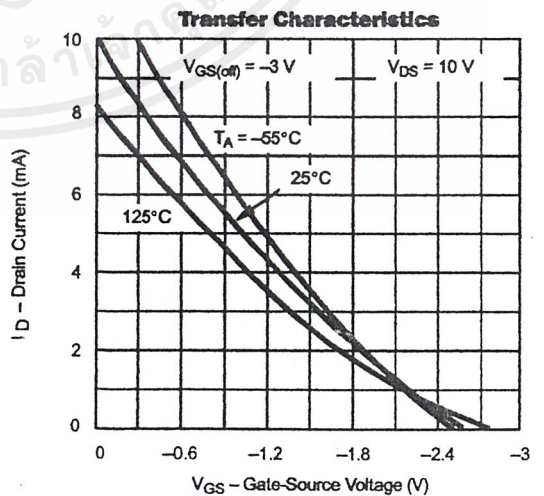
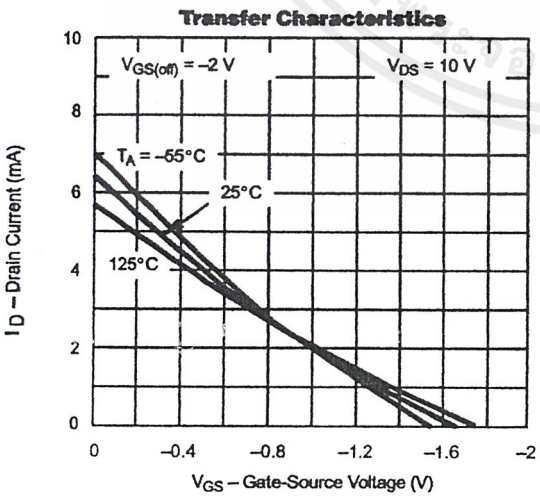
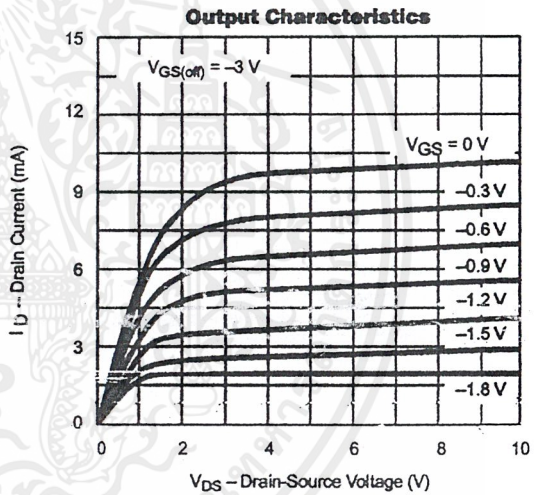
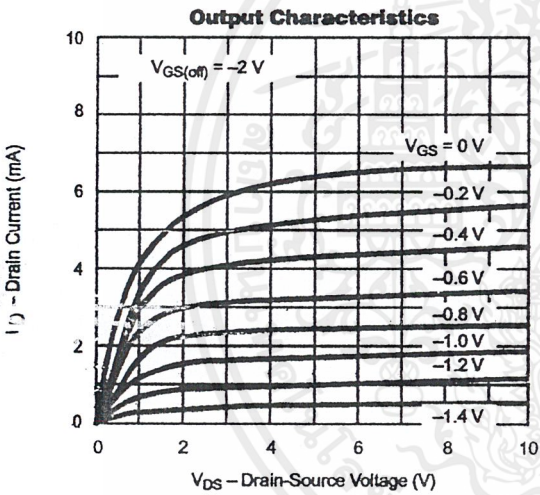
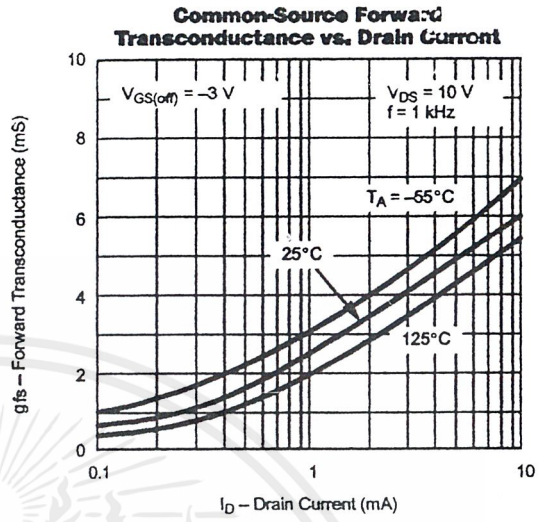
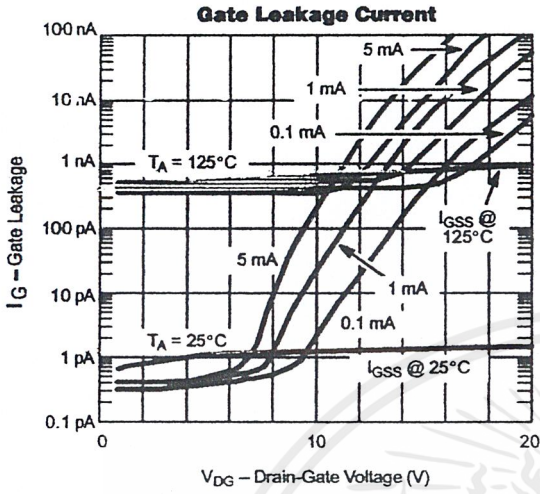
NH

**TYPICAL CHARACTERISTICS**



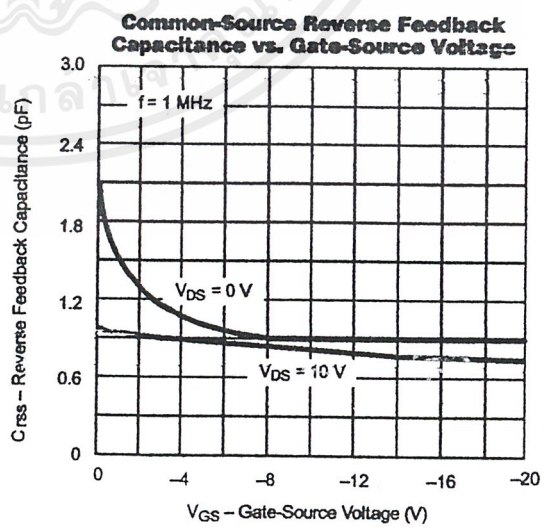
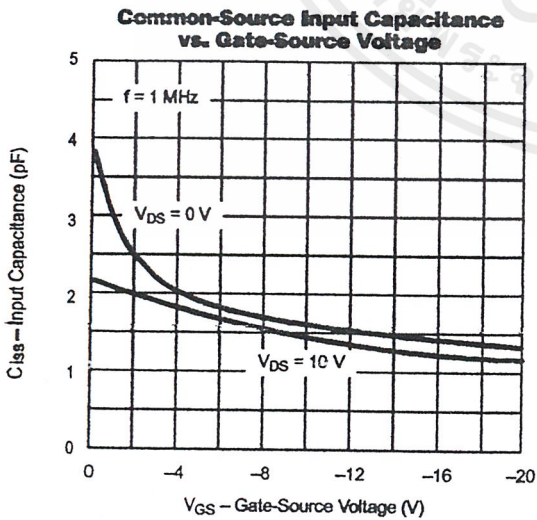
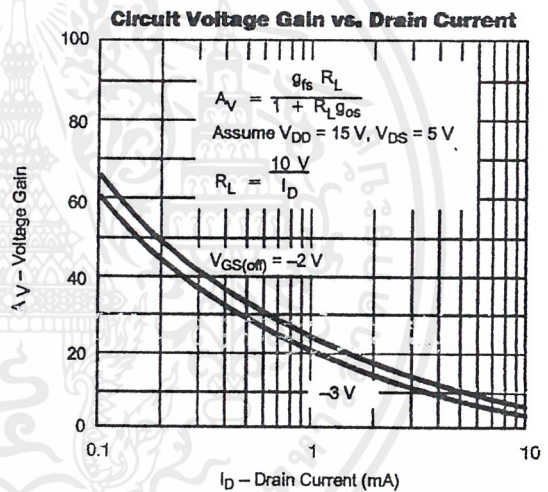
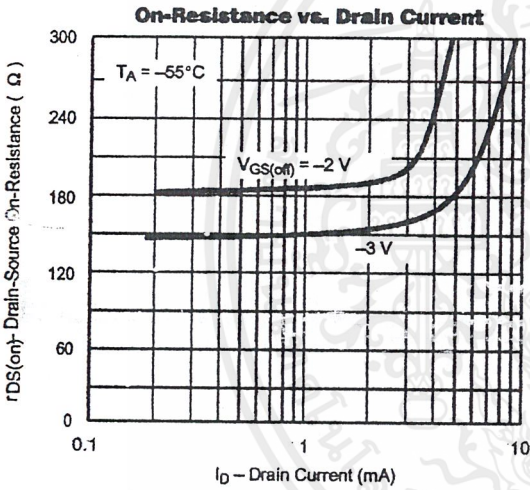
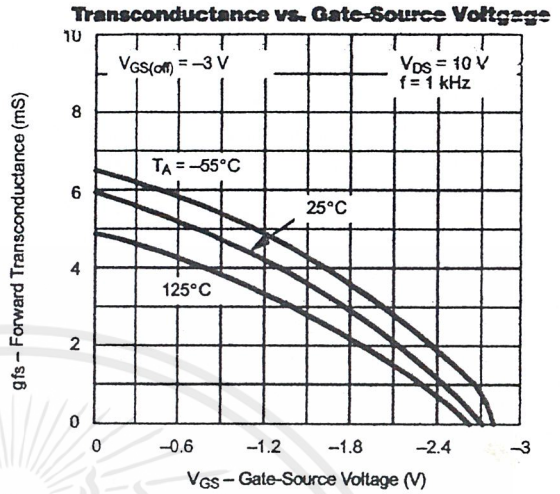
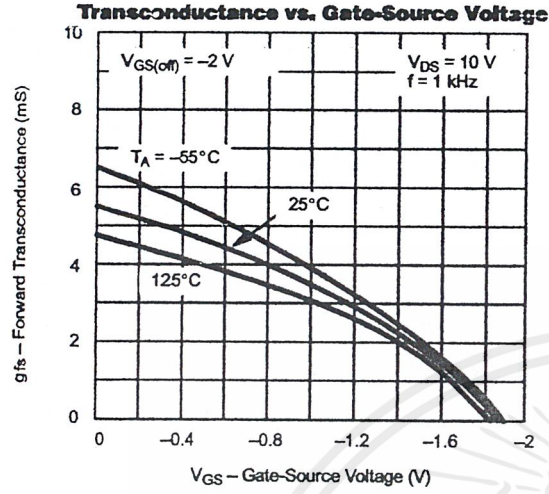
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TYPICAL CHARACTERISTICS**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TYPICAL CHARACTERISTICS**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ดูในเอกสารใบงานการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

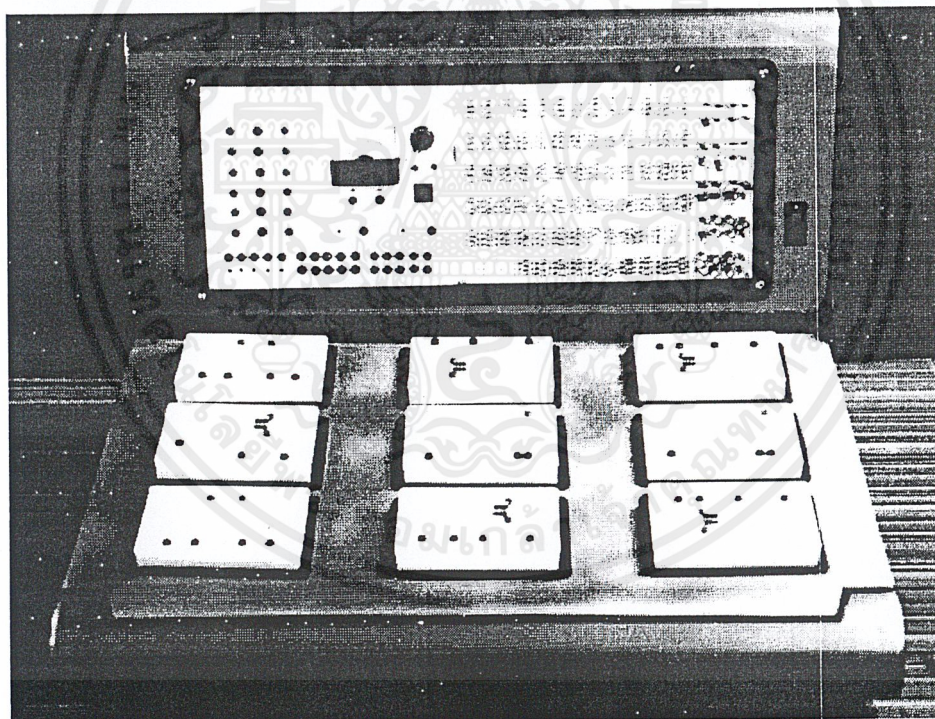
## คู่มือการใช้งาน

### ชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว FUNCTIONAL ELECTRONIC LABOLATORY

ชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว เป็นชุดทดลองที่ใช้สำหรับการปฏิบัติการทดลองในรายวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งส่วนประกอบหลัก ๆ ในชุดปฏิบัติการทดลองและส่วนของการแสดงบนคอมพิวเตอร์

#### 1) การใช้งานชุดปฏิบัติการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

##### 1.1) ชุดทดลองชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว



รูปที่ จ.1 บอร์ดทดลอง

1. ส่วนของด้านหน้าจะแบ่งออกเป็นส่วนของวงจรกิจักแรงดัน ชุดกำเนิดความถี่และ ส่วนของแผงอุปกรณ์

POWER : เป็นสวิตช์เปิด / ปิด การทำงานของชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POWER SUPPLY 1 : เป็นส่วนที่ใช้จ่ายแรงดันคงที่ ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันได้ทั้งด้านบวกและด้านลบ ค่าแรงดันที่จ่ายออกมามีค่าดังนี้ 1V , 2V , 3V , 4V , 5V และ 15V

POWER SUPPLY 2 : เป็นส่วนที่ใช้สำหรับจ่ายแรงดันซึ่งจะจ่ายแรงดันที่ปรับค่าได้ตั้งแต่ 0-15 V

VOLUME : เป็นส่วนที่ใช้ปรับขนาดของแรงดัน ซึ่งสามารถปรับได้ 0-15 V

RESET : เป็นปุ่มควบคุมให้วงจรกำเนิดแรงดันทำงานในสภาวะปกติ

SUMPER : เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเป็นจุดเชื่อมต่อเพื่อให้มีจุดเชื่อมต่อเพิ่มมากขึ้น

FUNCTION GENERATOR : เป็นส่วนที่ใช้จ่ายความถี่ที่ได้จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ มีทั้งหมด 2 ชุด คือ OUTPUT 1 และ OUTPUT 2

แผงอุปกรณ์ : เป็นส่วนที่ใช้เก็บอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ของชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัวอุปกรณ์จะประกอบด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุค่าต่างๆ

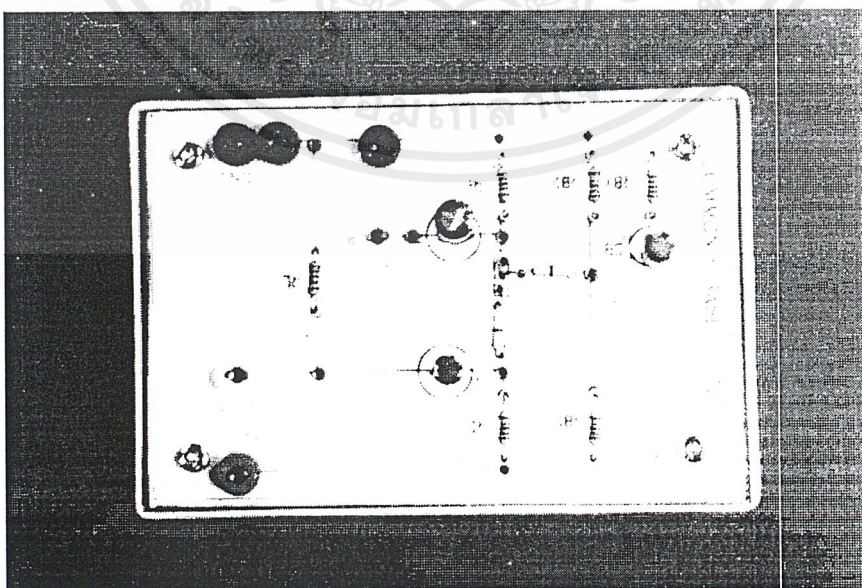
2. ส่วนของด้านบน จะประกอบด้วยช่วงขนาด 7 x 10.5 เซนติเมตร จำนวน 9 ช่อง มีไว้ใส่แผงทดลองวงจรเพื่อทำการทดลอง

3. ส่วนของด้านหลังและด้านข้าง

FUSE : ทำหน้าที่ตัดไฟที่จ่ายให้กับชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว

FUNCTION GENERATOR : เป็นส่วนที่ใช้รับความถี่ที่ได้จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ มีทั้งหมด 2 ชุด คือ INPUT 1 และ INPUT 2

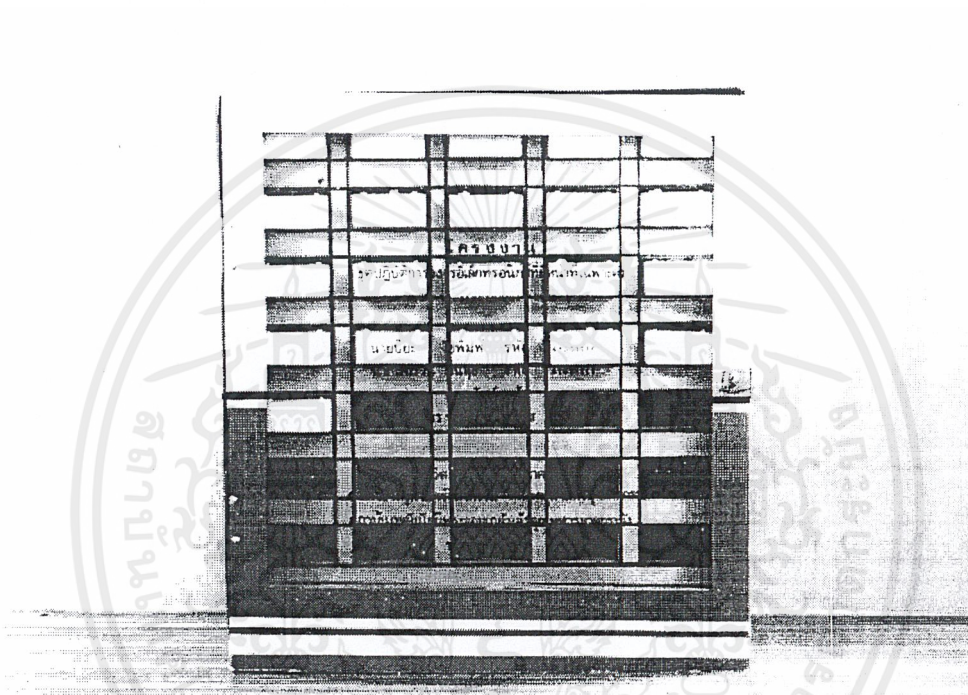
1.2) แผงทดลองของชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **รูปที่ จ.2** แผงทดลอง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปเป็นตัวอย่างแผงทดลองของชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว การใช้งานคือนำอุปกรณ์ที่กำหนดให้จากใบงานมาประกอบวงจรตามรูป โดยใส่ค่าอุปกรณ์ให้ถูกต้องและต่อวงจรแล้วทำการวัดค่าต่าง ๆ ตามใบงาน แผงทดลองจะมีไว้ 30 แผง

### 1.3) ตู้ใส่แผงทดลอง



รูปที่ จ.3 ตู้ใส่แผงทดลอง

จากรูปเป็นตู้ใส่แผงทดลองของชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว ก่อตั้งใส่แผงทดลองทำหน้าที่เก็บแผงทดลองจำนวน 30 แผง แต่ละช่องจะมีชื่อแผงทดลองกำกับไว้ในแต่ละช่อง ส่วนช่องด้านล่าง 2 ช่อง จะเป็นช่องใส่อุปกรณ์เช่น ไอซี ทรานซิสเตอร์ ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง และสายต่อเชื่อม

## 2) การใช้งานส่วนแสดงผล

การใช้งานในส่วนของการแสดงผลจะแบ่งเป็นส่วน ๆ ตามใบงานการทดลองซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

2.1) มัลติมิเตอร์ จะใช้สำหรับใบงานที่มีการทดลองที่ต้องการวัดเกี่ยวกับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทานของวงจรที่ทดลอง เช่น ใบงาน แหล่งจ่ายกระแสพื้นฐาน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

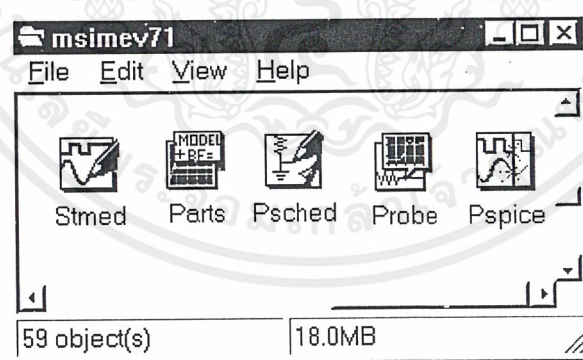
2.2) ออสซิลโลสโคป จะใช้สำหรับใบงานที่มีการทดลองที่ต้องการวัดเกี่ยวกับรูปสัญญาณของวงจรที่ทดลอง เช่น วงจรขยายพื้นฐานต่าง ๆ วงจรขยายผลต่าง วงจรขยายผลต่างที่ใช้โอปแอมป์ เป็นต้น

2.3) โปรแกรม Pspice เป็นส่วนแสดงผลทางจอกอมพิวเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบผลที่ได้ขอวงจรต่าง ๆ ในชุดปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่เฉพาะตัว กับผลที่ได้จาก มัลติมิเตอร์และออสซิลโลสโคป ซึ่งทุกใบงานจะต้องมีการทดลองโดยโปรแกรม Pspice จึงจะครบขั้นตอนการทดลองทั้งหมด ซึ่งการใช้โปรแกรม Pspice นั้นนักศึกษาที่จะต้องทดลองใบงานนั้นจะต้องมีความรู้พื้นฐานมาแล้ว ดังนั้นคู่มือการใช้งานนี้จะอธิบายถึงขั้นตอนการทดลองโดยโปรแกรม Pspice ที่จำเป็นสำหรับทดลองในใบงานเท่านั้น ดังต่อไปนี้

การใช้งานโปรแกรม Pspice จะแนะนำการใช้ทั้งในกรณีที่เขียนวงจรด้วยกราฟฟิกและเขียนวงจรโดยบรรยายเป็นข้อความ ซึ่งทั้งสองวิธีมีขั้นตอนที่คล้ายกัน แต่วิธีแรกจะสะดวกในกรณีสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษาโปรแกรม ส่วนวิธีหลังเหมาะสำหรับผู้ที่ทำงานที่ต้องการความรวดเร็วและมีการแก้ไขพารามิเตอร์ของอุปกรณ์โซลิดสเตทบ่อย ๆ เช่นในการทำงานวิจัย เป็นต้น

### 1. องค์ประกอบของ Design Center

Design Center ของบริษัท Micro Sim ประกอบด้วยโปรแกรมต่างๆ สามารถสรุปเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ จ.4



รูปที่ จ.4 โครงสร้างของ Design Center

จากรูปที่ จ.4 มีองค์ประกอบที่สำคัญ 5 ส่วนด้วยกันคือ

**Schematics:** เป็นตัวควบคุมการใช้โปรแกรมในการออกแบบ และเป็นอิดิเตอร์ (Editor) สำหรับเขียนวงจรและเลียนแบบการทำงาน พร้อมทั้งแสดงผลเชิงกราฟฟิก

**Pspice:** เป็นตัววิเคราะห์และเลียนแบบการทำงานของวงจรแอนาลอก, ดิจิตอล และรวมทั้ง

เอกซารน์เป็นเอกซารน์แอนาลอกและดิจิตอล (Mixed Mode) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Probe: เป็นตัวนำผลการวิเคราะห์จาก Pspice ในเชิงตัวเลขมาแสดงผลเชิงกราฟฟิกส์
- Stimulus Editor: เป็นเครื่องมือในการสร้างสัญญาณอินพุต เช่น สัญญาณสำหรับวงจรดิจิทัลต่าง ๆ
- Parts: เป็นเครื่องมือในการรักษาคุณลักษณะของอุปกรณ์ สารกึ่งตัวนำและวงจรร้อย

## 2. ความสามารถของ Pspice และ Probe

โปรแกรม Pspice และ Probe สามารถวิเคราะห์ และแสดงผลเชิงกราฟฟิกส์ได้ดังนี้คือ

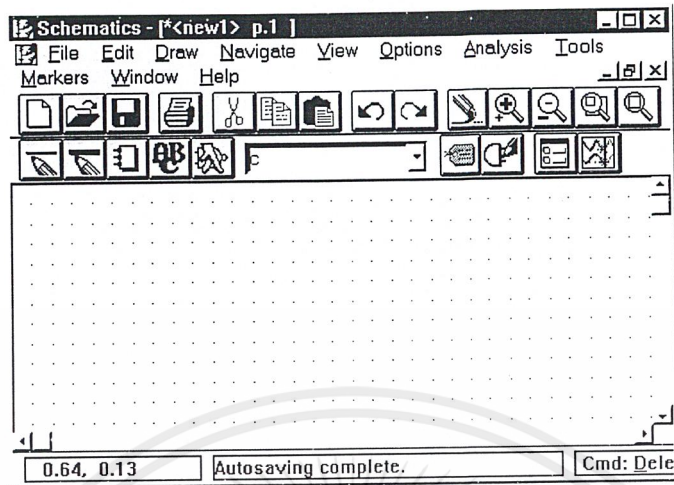
1. AC Sweed สำหรับการวิเคราะห์วงจรในโดเมนความถี่
2. Transient สำหรับการวิเคราะห์วงจรในโดเมนเวลา
3. DC Sweed สำหรับการคำนวณค่ากระแส, แรงดันและสถานะของวงจรในสถานะสงบ โดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าแหล่งจ่าย, โมเดลหรืออุมหุมิที่พิสัยต่างๆ ได้
4. Bias Point สำหรับการคำนวณจุดไบแอสและพร้อมรายงานผลให้ทราบ
5. Small Signal Transfer สำหรับการคำนวณอัตราขยายขนาดเล็ก ความต้านทานอินพุต และความต้านทานเอาต์พุตได้
6. Sensitivity สำหรับการคำนวณหาผลตอบสนองของวงจรเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของโมเดลของอุปกรณ์
7. วิเคราะห์ Parametric และ Temperature ในลักษณะ Muti Run ได้

## 3. วิธีการใช้โปรแกรม Pspice ในการวิเคราะห์วงจร

การใช้งานโปรแกรมสามารถศึกษาได้ง่ายจากเมนูของโปรแกรม ซึ่งสามารถสรุปเมนูต่างๆ ไว้ดังรูปที่ จ.5 และแต่ละเมนูหลักจะมีเมนูย่อย ๆ ที่มีหน้าที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผู้อ่านสามารถใช้งานในขั้นต้นได้ จึงอธิบายสรุปเฉพาะเมนูที่สำคัญ 4 เมนูหลักคือ

### เมนู File

ประกอบด้วยคำสั่งต่าง ๆ ดังได้อธิบายไว้ในรูป ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความหมายเหมือนกับเมนูของวินโดวส์ นอกจากคำสั่งเฉพาะเท่านั้น อย่างไรก็ตามแต่ละคำสั่งใช้งานได้ง่ายเพราะแต่ละคำสั่งสื่อความหมายในตัวเองชัดเจน แต่หากยังไม่เข้าใจดีพอก็สามารถดูได้จากเมนู Help ดูจากคู่มือการใช้งานประกอบสามารถใช้คำสั่งต่าง ๆ ได้

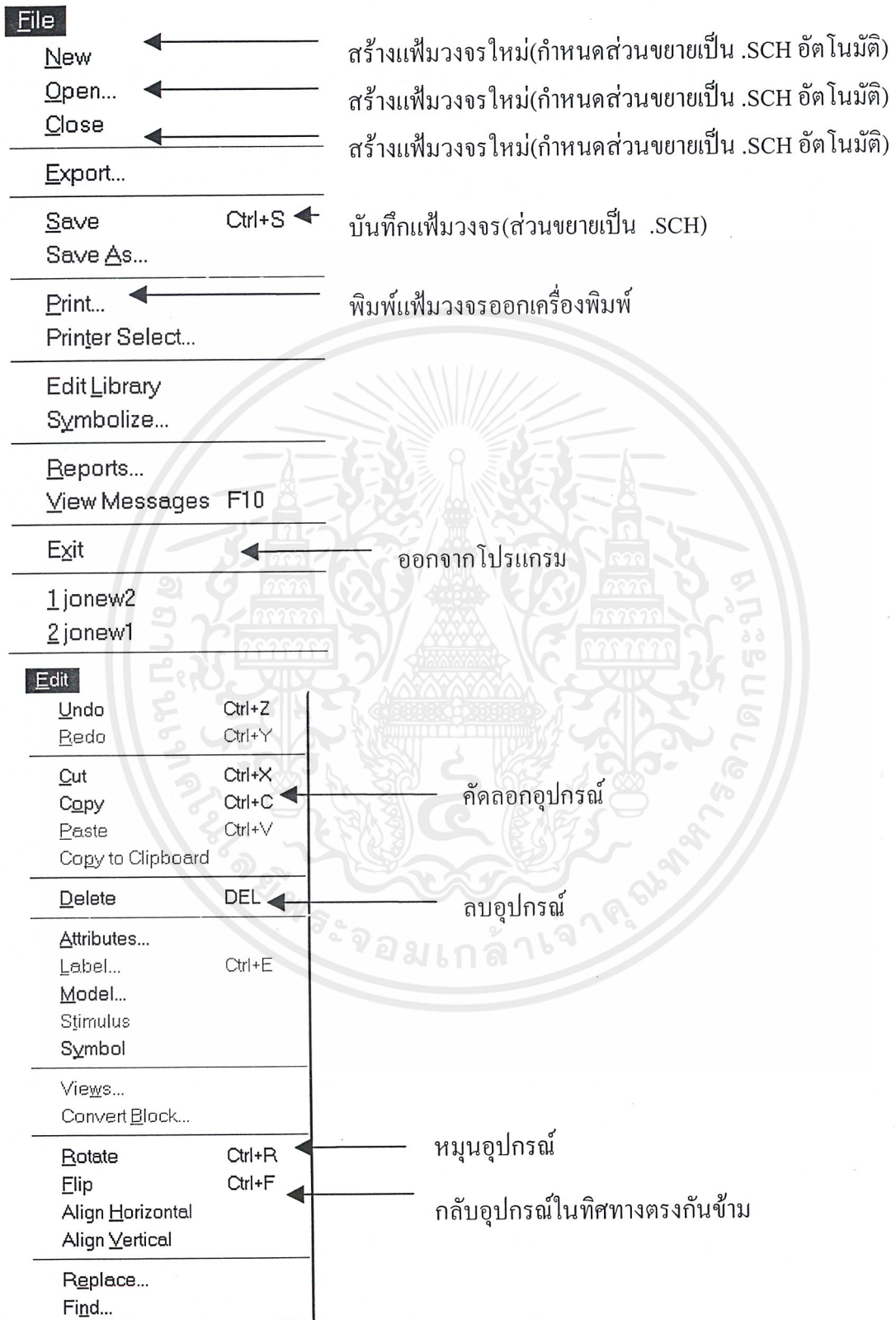


รูปที่ จ.5 เมนูหลักต่าง ๆ ของโปรแกรม Pspice หลังจากเรียกโปรแกรม Schematics

เมนูในรูปที่ จ.6 เป็นเมนู File และเมนู Edit โดยที่เมนู File จะจัดการเกี่ยวกับไฟล์ของ เพิ่มข้อมูล เช่นสร้างเพิ่มข้อมูลใหม่ เปิดเพิ่มข้อมูล บันทึกเพิ่มข้อมูล การสั่งพิมพ์ออกเครื่อง พิมพ์ และการจัดการเกี่ยวกับ Library ซึ่งการจัดการแก้ไข อุปกรณ์ใน Library จะไม่กล่าวไว้ใน ส่วนนี้

#### เมนู Edit

ในรูปที่ จ.6 เป็นเมนูเกี่ยวกับการแก้ไขต่าง ๆ เช่น การลំเนาอุปกรณ์ การลบอุปกรณ์ การแก้ไขสัญญาณกระตุ้นและสัญญาณ การหมุนอุปกรณ์ การกลับตำแหน่งอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งมีประโยชน์เมื่อต้องการวางอุปกรณ์ให้ได้ตามที่ต้องการ หรือต้องการปรับปรุงแก้ไขวงจรในลักษณะต่าง ๆ ก็สามารถใช้นิเมนูนี้ได้ โดยมีวิธีการคือถ้าต้องการแก้ไขหรือปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ตัวใดก็ให้เลื่อนเคอร์เซอร์ไปยังอุปกรณ์ตัวนั้นและคลิกหนึ่งครั้งเพื่อเลือกอุปกรณ์ที่จะแก้ไขหลังจากนั้นจึงใช้คำสั่งในเมนูนี้ และออกจากคำสั่งโดยการกดคีย์ Esc



รูปที่ ๖.6 รายละเอียดของเมนู File และ Edit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเมนู Draw ในรูปที่ จ.7 เป็นเมนูที่จัดการเกี่ยวกับการวาดวงจรโดยเริ่มจากการเลือกอุปกรณ์ที่ต้องการด้วยคำสั่ง Get New Part และวางโดยการคลิก ณ ตำแหน่งที่ต้องการหรือกดคีย์ Ctrl + P (กด Ctrl ค้างไว้พร้อมกับกดคีย์ P) และเมื่อต้องการเชื่อมต่อสายระหว่างอุปกรณ์ก็ใช้คำสั่ง Wire โดยเลื่อนแถบสว่างมายังคำสั่ง Wire แล้วกดคีย์ Enter ซึ่งวิธีการใช้คำสั่งและออกจากคำสั่งจะเหมือนกันในทุก ๆ คำสั่งดังนั้นคำสั่งอื่น ๆ ก็ใช้ในทำนองเดียวกัน

เมื่อวาดอุปกรณ์เสร็จเรียบร้อยแล้วก็เป็นขั้นตอนการใส่ค่าให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น การใส่ค่าให้ตัวต้านทานทำได้โดยการเลื่อนเคอร์เซอร์ไปยังค่าของอุปกรณ์ (ที่กำหนดค่าเริ่มต้นมาให้) แล้วคลิกที่ ๆ สองครั้งจะปรากฏหน้าต่างให้ใส่ค่าที่ต้องการ หลังจากใส่ค่าที่ต้องการแล้วก็กดคีย์ Enter ส่วนอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายให้คลิกที่สองครั้งบนอุปกรณ์จะปรากฏหน้าต่างให้ใส่ค่าต่าง ๆ เช่นเดียวกันซึ่งดูได้ในตัวอย่างการใช้งาน

Draw		
Repeat	Space	คืนฟังก์ชันอดีตหนึ่ง
Place Part	Ctrl+P	วางอุปกรณ์
Text...	Ctrl+T	
Wire	Ctrl+W	วางสายเชื่อมโยงระหว่างอุปกรณ์
Bus	Ctrl+B	
Block		
Get New Part...	Ctrl+G	เลือกอุปกรณ์ที่จะใช้สร้างวงจร
Rewire	Ctrl+D	
Analysis		
Electrical Rule Check		ตรวจสอบกฎทางไฟฟ้า
Create Netlist		สร้างเพิ่มข้อความบรรยายวงจรแทน
Edit Stimuli		
Setup...		กำหนดประเภทของการวิเคราะห์
Library and Include Files...		
Simulate	F11	สั่งให้วิเคราะห์วงจร
Probe Setup...		สั่งให้วิเคราะห์วงจร
Run Probe	F12	ดูผลแบบกราฟฟิค(ส่วนขยายคือ .DAT)
Examine Netlist		ผลการแปลงวงจรกราฟฟิคเป็นข้อความ
Examine Output		

รูปที่ จ.7 รายละเอียดของเมนู Draw และ Analysis

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เมนู Analysis

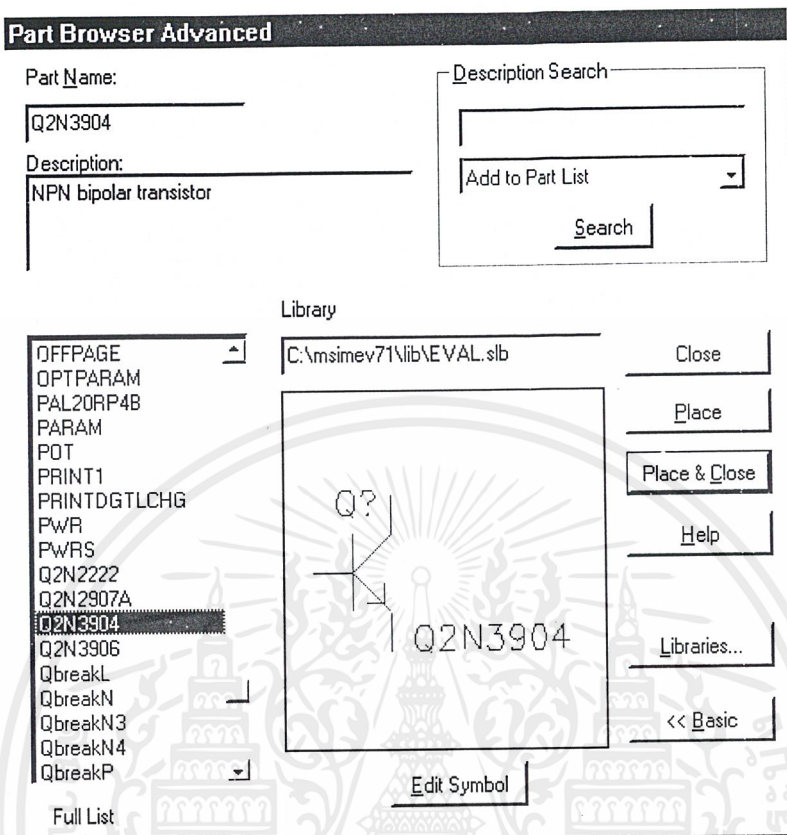
ในรูปที่ จ.7 เป็นเมนูที่จัดการเกี่ยวกับการวิเคราะห์ โดยเมื่อวาดวงจรเสร็จเรียบร้อยแล้วก็ตรวจสอบกฎทางไฟฟ้าว่าวงจรถูกต้องหรือไม่โดยคำสั่ง Electrical Rule Check จากนั้นมายังการกำหนดการวิเคราะห์ คือ Setup หลังจากคลิกในคำสั่งนี้จะปรากฏหน้าต่างให้เลือกว่าจะวิเคราะห์อย่างไร เช่น วิเคราะห์ในโดเมนความถี่ (AC Sweep) หรือ วิเคราะห์ในโดเมนเวลา (Transient) เป็นต้น จากนั้นสั่งวิเคราะห์ด้วยคำสั่ง Simulate ถ้าวางจรไม่ผิดพลาดโปรแกรมจะประมวลผลและกำเนิดเพิ่มข้อมูลที่สำคัญ 4 เพิ่มคือเพิ่มที่มีส่วนขยายเป็น .CIR, .NET, .OUT และ .DAT โดย .CIR เป็นเพิ่มข้อความบรรยายการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในวงจรที่ถูกกำหนดเป็น โหนดต่าง ๆ ส่วน .NET เป็นส่วนที่เก็บคำสั่ง และ Library ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ส่วน .OUT เก็บข้อมูลของวงจรและผลลัพธ์จากการประมวลผลต่าง ๆ เช่นข้อความบรรยายการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ เพิ่มที่เก็บข้อมูลผลลัพธ์แบบเชิงตัวเลขเพื่อนำไปพล็อตด้วยโปรแกรม Probe นั้นเอง และหลังจากตั้งวิเคราะห์แล้ว โปรแกรมจะกำหนดไว้ให้เรียกโปรแกรม Probe อัตโนมัติและจะเข้าสู่เมนู Probe ซึ่งจะอธิบายในตอนต่อไป

### 4. ขั้นตอนการวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice

#### 4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์วงจรโดยกำหนดเพิ่มอินพุตเป็นกราฟฟิก

ขั้นตอนการวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice ที่กำหนดเพิ่มอินพุตเป็นกราฟฟิกโดยการวาดวงจรด้วยเครื่องมือของโปรแกรมสรุปขั้นตอนที่สำคัญโดยทดลองวาดวงจรจริง ๆ ดังนี้

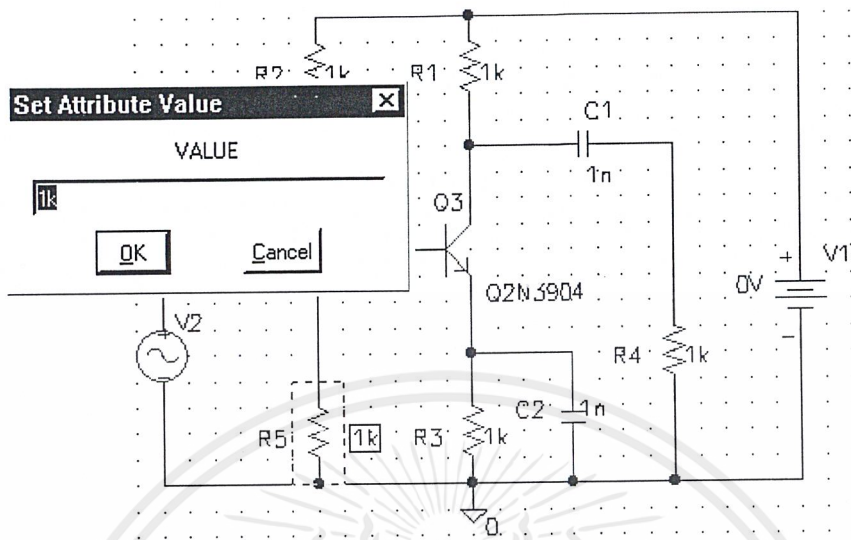
ขั้นที่ 1 เริ่มจากเรียกโปรแกรม Schematic ตามการใช้งานโปรแกรมวินโดวส์ จะปรากฏหน้าต่างและเมนูต่าง ๆ ดังรูปที่ จ.5 และวาดวงจรโดยใช้เมนู Draw เลือกอุปกรณ์โดยคำสั่ง Get New Part จะปรากฏเมนู



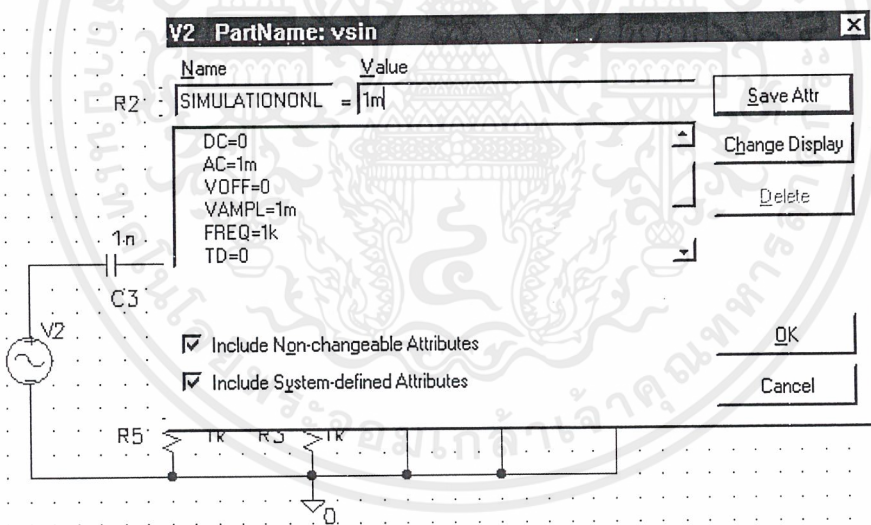
รูปที่ จ.8 ขั้นตอนการวิเคราะห์วงจรโดยใช้โปรแกรม Pspice

เมื่อเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ แล้วจากนั้นเชื่อมโยงสายโดยใช้คำสั่ง Wire ในเมนูเดิมแล้วลากสายต่าง ๆ และถ้าต้องการปรับตำแหน่งอุปกรณ์ตัวใดก็ใช้คำสั่งในเมนู Edit ในตัวอย่างนี้จะใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อ ดังนี้ r , c , Q2N3904, แหล่งจ่ายสัญญาณ vsin , แหล่งจ่ายกำลังไฟตรง vsrc และกราวด์ ซึ่งต้องเลือกจากด้านขวามือของวินโดวส์ หลังจากนั้นใส่ค่าต่าง ๆ ให้อุปกรณ์โดยคลิกเมาส์บนอุปกรณ์ต่าง ๆ ยกเว้นอุปกรณ์ไวงานเพราะกำหนดพารามิเตอร์ไว้ใน Library แล้ว สำหรับตัวอย่างการกำหนดค่าให้อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ จ.8 และเมื่อกำหนดค่าต่าง ๆ แล้ว จะได้วงจรอิมิตเตอร์รวม ดังรูปที่ จ.9 หลังจากนั้นบันทึกข้อมูลโดยใช้เมนู File ดังกล่าวในตอนต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ตัวอย่างการกำหนดค่าความต้านทาน

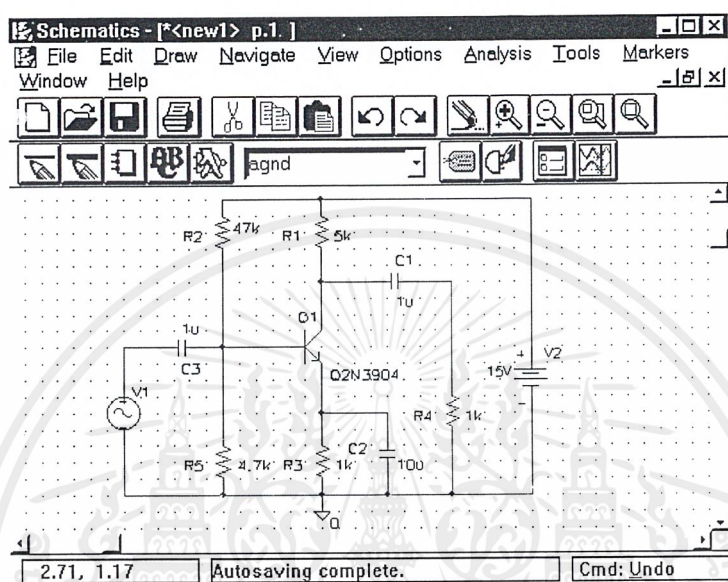


(ข) ตัวอย่างการกำหนดค่าใช้แหล่งจ่าย VSIN

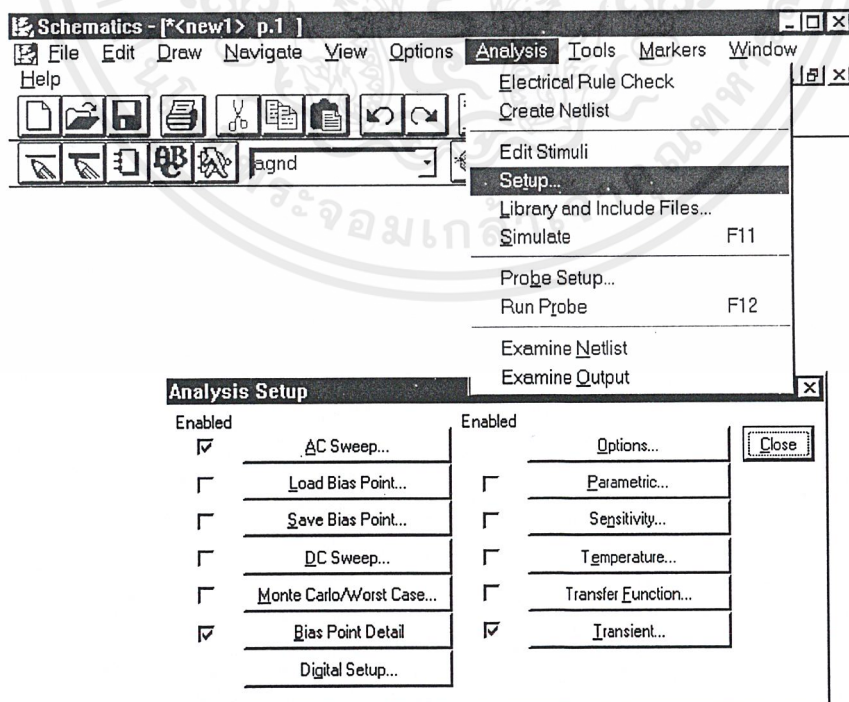
รูปที่ จ.9 (ก) ตัวอย่างการกำหนดค่าความต้านทาน (ข) ตัวอย่างการกำหนดค่าใช้แหล่งจ่าย VSIN

ขั้นที่ 2 หลังจากวาดวงจรเสร็จตามขั้นตอนที่ 1 แล้ว ในขั้นตอนนี้เป็นการวิเคราะห์โดยใช้เมนู Analysis โดยเริ่ม การเรียงลำดับตัวเลขเรียกอุปกรณ์ที่ซ้ำซ้อนจาก คำสั่ง Annotate จากนั้น ใช้คำสั่ง Electrical Rule Check ในเมนูนี้เพื่อตรวจสอบดูว่าวงจรทำงานถูกต้องหรือไม่ เมื่อถูกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องให้เลือกคำสั่ง Setup จะปรากฏเมนูดังรูปที่ จ.12 สมมุติในตัวอย่างนี้เลือกการวิเคราะห์ AC Seew และ Transient ก็คลิกเมาส์ที่ช่องสี่เหลี่ยมที่ตรงกับชนิดการวิเคราะห์นั้นดังรูป



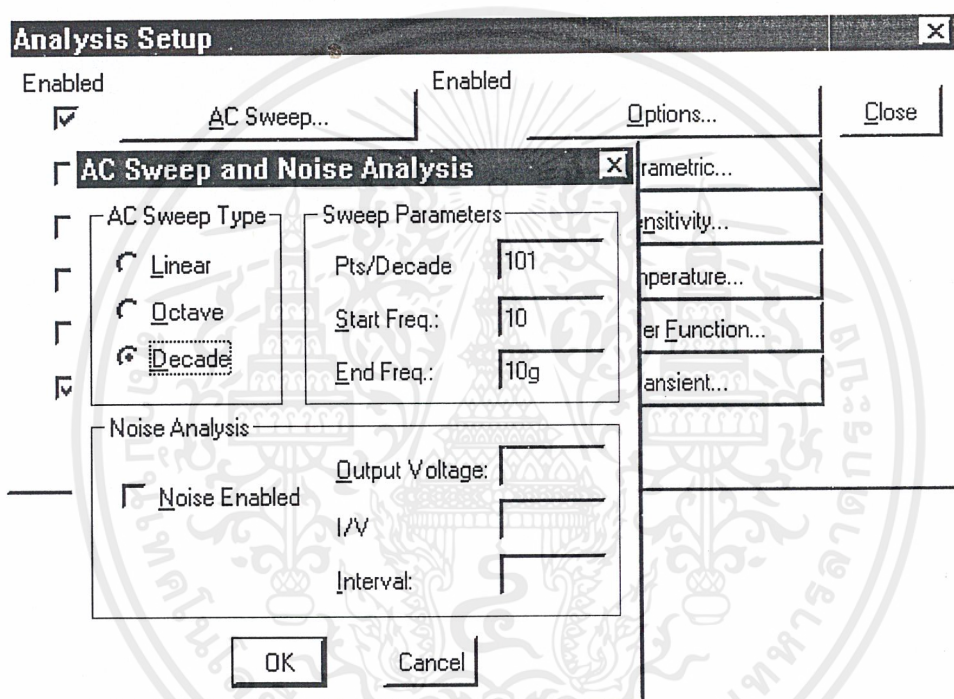
รูปที่ จ.10 วงจรขยายอิมิตเตอร์ร่วมหลังจากวาดในขั้นตอนที่ 1



รูปที่ จ.11 การเลือกการวิเคราะห์

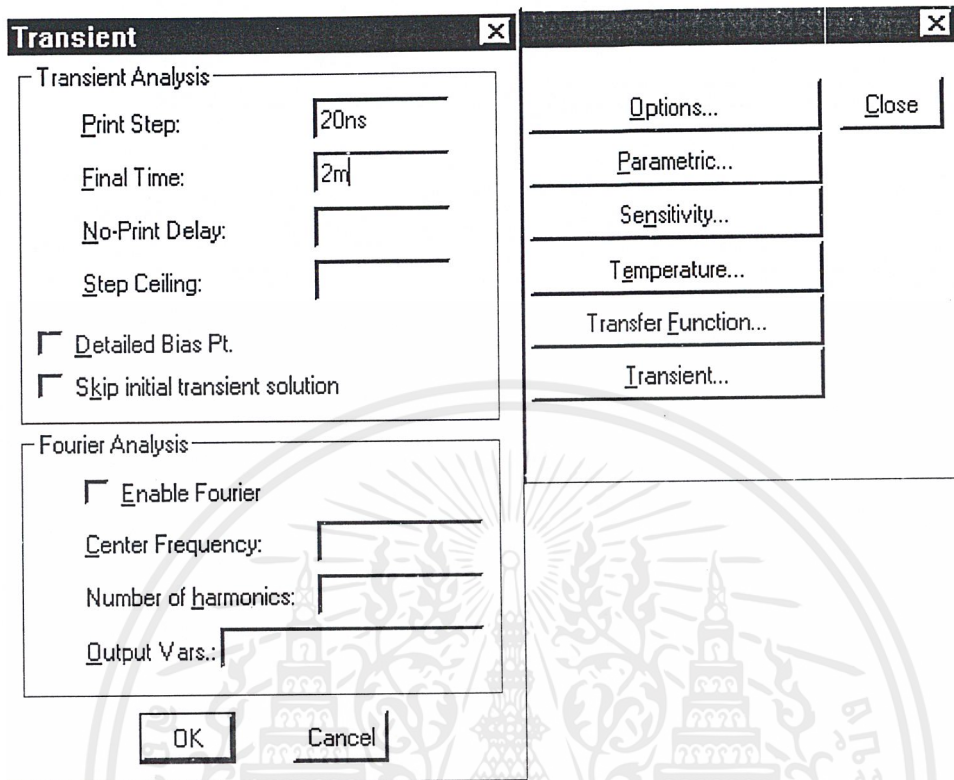
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการวิเคราะห์ AC Sweep จะต้องกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์โดยการเลื่อนเคอร์เซอร์บนชนิดการวิเคราะห์แล้วคลิกเมาส์จะปรากฏเมนูดังรูปที่ จ.13 จากนั้นใส่ค่าต่าง ๆ ตามต้องการ ในตัวอย่างนี้ใช้ขนาดสัญญาณ AC ที่กำหนดในแหล่งจ่ายสัญญาณเท่ากับ 1mV และต้องการให้เปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 1Hz ถึง 10 GHz โดยเลือกการคำนวณแบบ Decade คือการแสดงความถี่จะเพิ่มครั้งละ 10 เท่า เพื่อไม่ให้แกนยาวเกินไป โดยกำหนดให้ในแต่ละช่วงความถี่ เท่ากับ 101 จุด แล้วคลิกปุ่ม OK ดังรูป

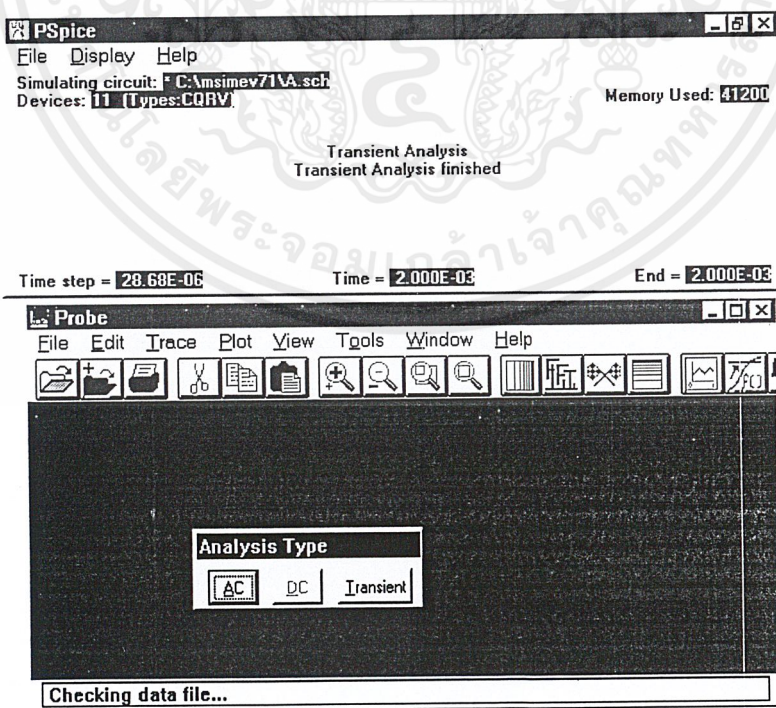


รูปที่ จ.12 การเลือกวิเคราะห์แบบ AC Sweep

โดยการวิเคราะห์ Transient จะต้องกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์โดยการเลื่อนเคอร์เซอร์บนชนิดการวิเคราะห์แล้วคลิกเมาส์จะปรากฏเมนูดังรูปที่ จ.12 จากนั้นใส่ค่าต่าง ๆ ตามต้องการ ตัวอย่างนี้ใช้ขนาดสัญญาณ AC ที่กำหนดในแหล่งจ่ายสัญญาณเท่ากับ 1mV และความถี่ตั้งแต่ 1kHz ดังนั้น 1 คาบของสัญญาณใช้เวลา 1ms ดังนั้นถ้าต้องการวิเคราะห์สัญญาณ 2 คาบจะต้องกำหนดเวลาสุดท้ายให้กับการวิเคราะห์ชนิดนี้ โดยมันจะเริ่มวิเคราะห์จาก 0 ถึงเวลาสุดท้าย โดยกำหนดขึ้นเวลาในการคำนวณว่าต้องการให้เพิ่มจาก 0 ครั้งละเท่าไร ในตัวอย่างนี้ใช้ 20ns ดังแสดงในรูปที่ 10 หลังจากนั้นคลิกปุ่ม OK



รูปที่ จ.13 การเลือกวิเคราะห์แบบ Transient



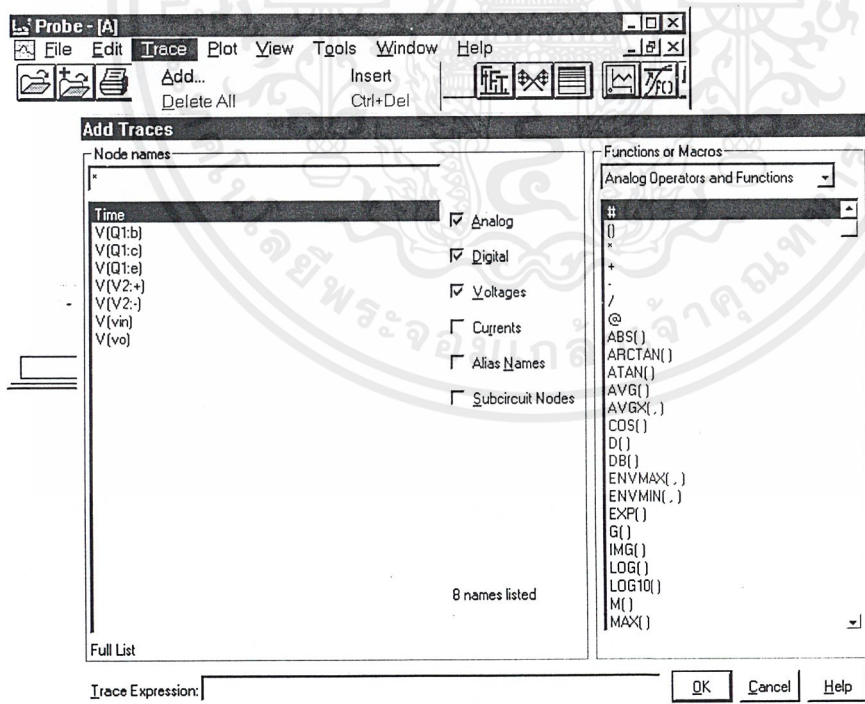
รูปที่ จ.14 หน้าต่างหลังจากการ Simulate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ Simulate โดยใช้คำสั่งในเมนู Analysis เช่นกันโดยเลือกคำสั่ง Simulate จะปรากฏหน้าต่างการวิเคราะห์และเมื่อวิเคราะห์เสร็จจะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรม PROBE อัดโนมัตติงรูปที่ จ.14 สังเกตว่าจะปรากฏหน้าต่างเล็ก ๆ ในหน้าต่างของ PROBE เพื่อให้เลือกที่จะให้แสดงผลของการวิเคราะห์แบบใดซึ่งจะกล่าวรายละเอียดในขั้นตอนที่ 3

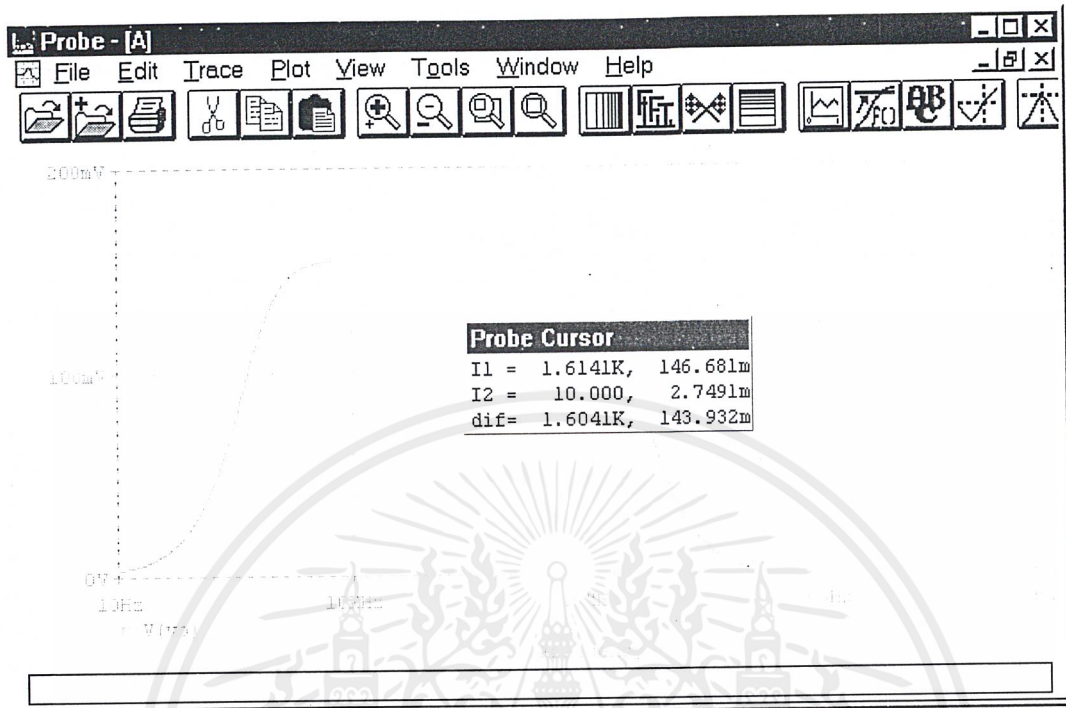
ขั้นที่ 3 การใช้หน้าต่าง PROBE แสดงผลการวิเคราะห์ในลักษณะกราฟฟิก โดยสมมุติเลือก AC จากหน้าต่างเล็ก ๆ ที่แสดงหน้าต่าง PROBE จะปรากฏเมนูต่าง ๆ จากนั้นเลือก Trace และ Add จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ จ.15 ถ้าต้องการวัดแรงดันเอาต์พุต (ได้กำหนดชื่อที่จะวัดไว้ในวงจร)  $V(vo)$  ก็คลิกบนตัวแปลนั้นแล้วจะปรากฏรูปผลการตอบสนองความถี่จาก 1 Hz ถึง 10 GHz ตามที่กำหนดไว้ในชนิดการเลือกการวิเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ จ.15

จากรูปที่ จ.15 เมื่อได้กราฟแล้วเราสามารถวัดขนาดต่าง ๆ ได้โดยใช้เมนู Tools โดยในเมนูนี้จะมีคำสั่งต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการหาค่าขนาดทั้งด้านแกนแนวนอนและแนวตั้งของกราฟ นอกจากนี้ยังมีคำสั่งในการตกแต่งและแสดงข้อความต่าง ๆ บนกราฟได้ซึ่งจะไม่ขอกว่าในรายละเอียดของหัวข้อนี้



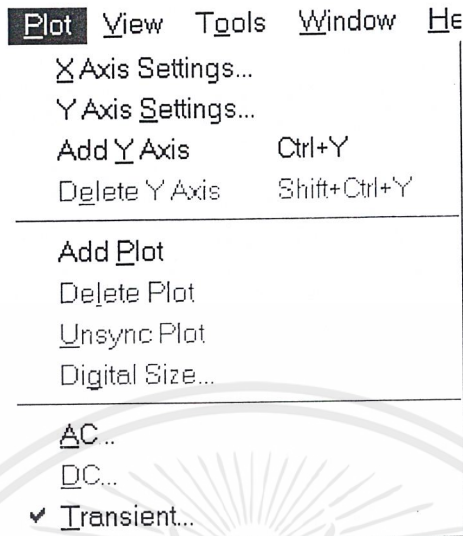
รูปที่ จ.15 ผลจากการเลือกวิเคราะห์แบบ AC และ เลือก Trace และ Add

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



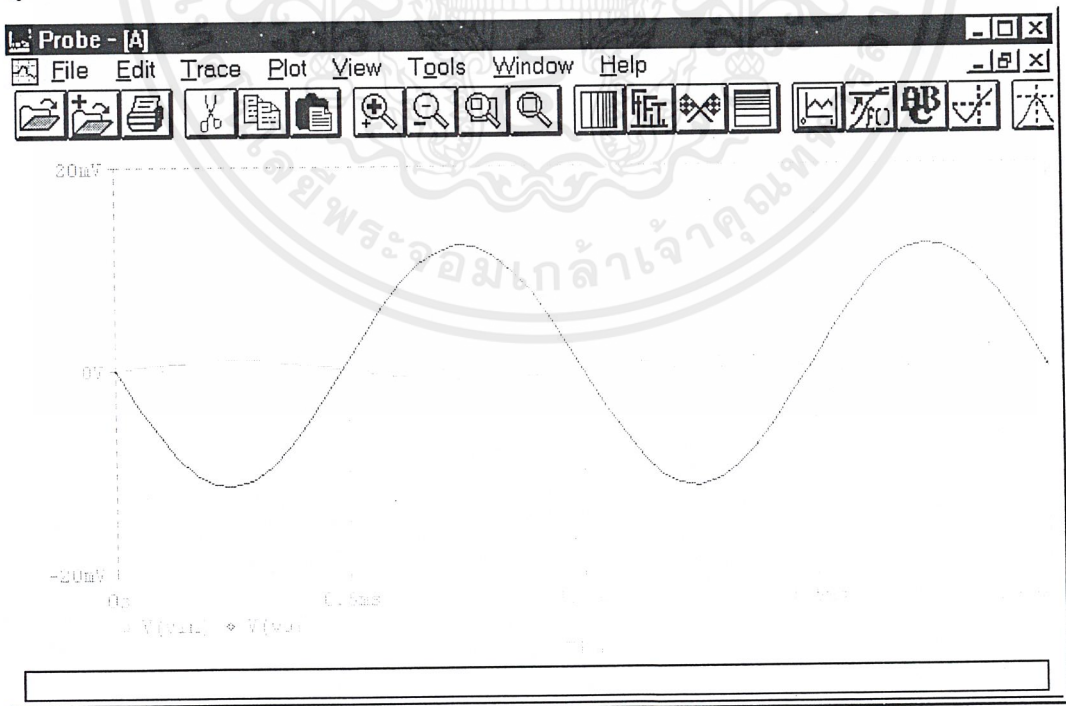
รูปที่ จ.16 ผลจากการเลือกวิเคราะห์แบบ AC และ เลือก Trance และ Add

เช่นกันถ้าเลือก Transient จากหน้าต่างเล็ก ๆ ที่แสดงบนหน้าต่าง PROBE จะปรากฏเมนูต่าง ๆ จากนั้นเลือก Trace และ Add จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ จ.15 แต่ในกรณีที่ทำงานอยู่ที่เมนู PROBE แล้วต้องการเปลี่ยนการวิเคราะห์เป็น Transient สามารถทำได้โดยเลือกเมนู PLOT จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ จ.17 และเลือก Transient ตามรูปที่ จ.15 แล้วจะปรากฏหน้าต่าง PROBE ว่าง ๆ ขึ้นใหม่อีกครั้ง จากนั้นเลือก Trace และ Add จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ จ.15



รูปที่ จ.17 การเลือกเมนู PLOT และการเลือกการวิเคราะห์แบบ Transient

ถ้าต้องการวัดแรงดันอินพุตและเอาต์พุต (ได้กำหนดชื่อที่จะวัดไว้ในวงจร) ก็คลิกบนตัวแปร  $V(vin)$  และ  $V(vo)$  นั้นแล้วจะปรากฏรูปสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตความถี่จาก 1kHz ตามที่ได้กำหนดไว้ในการเลือกชนิดการวิเคราะห์ แต่สัญญาณจะถูกขยายให้มีขนาดใหญ่กว่าเดิมดังแสดงในรูปที่ จ.18



รูปที่ จ.18 รูปสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ความถี่จาก 1 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้เป็นขั้นตอนการใช้โปรแกรมเบื้องต้นเมื่ออินพุตเป็นกราฟฟิก

### 5. ขั้นตอนการวิเคราะห์ห้วงจรโดยกำหนดเพิ่มข้อมูลเป็นข้อความ

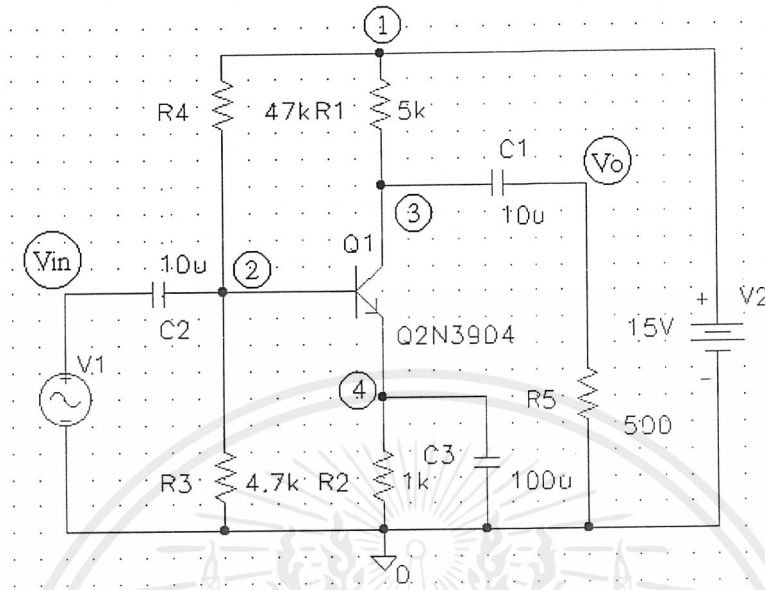
ขั้นตอนการวิเคราะห์ห้วงจร โดยใช้โปรแกรม Pspice ที่กำหนดเพิ่มอินพุตเป็นข้อความ บรรยายแทนกราฟฟิกสามารถสรุปขั้นตอนที่สำคัญ โดยทดลองบรรยายวงจรถายในวิธีที่หนึ่งได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 นำวงจรที่ต้องการวิเคราะห์ห้มากำหนดโนดต่าง ๆ เพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งของอุปกรณ์ โดยมีข้อกำหนดที่สำคัญคือ กราวด์ของวงจรจะต้องเป็นโนดศูนย์เท่านั้นส่วนโนดอื่น ๆ ใช้ตัวเลขอะไรก็ได้ดังแสดงในรูปที่ จ.19 และเขียนบรรยายอุปกรณ์ที่อยู่ระหว่างโนดได้จากรูปแบบดังนี้

R Node1 Node2 Value	สำหรับความต้านทาน
C Node1 Node2 Value	สำหรับตัวเก็บประจุ
V Node1 Node2 DC Value	สำหรับแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรง
V Node1 Node2 AC SIN(V <sub>off</sub> V <sub>amp</sub> freq td df phase)	สำหรับแรงดัน ไฟตรงสลับที่เป็นไซน์
Q C B E <Link name>	สำหรับทรานซิสเตอร์
.AC [LIN][OCT][DEC] <points> <start freq> <end freq>	สำหรับกำหนดการวิเคราะห์แบบ AC
.TRAN <print step> <final time> <step time>	สำหรับกำหนดการวิเคราะห์แบบ Transient
.MODEL <link name> <type name> [<parameter>=<value>]	สำหรับกำหนดพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์

(สำหรับรายละเอียดอื่น ๆ สามารถอ่านได้ในคู่มือ โปรแกรม โดยทั่วไป)

ดังนั้น ใช้ข้อกำหนดดังกล่าวเขียนบรรยายได้ดังรูปที่ จ.18 แล้วบันทึกด้วยชื่อที่มีส่วนขยายเป็น .CIR ดังได้กล่าวแล้วในตอนต้น



รูปที่ จ.19 กำหนดโนดต่างๆ เพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งของอุปกรณ์

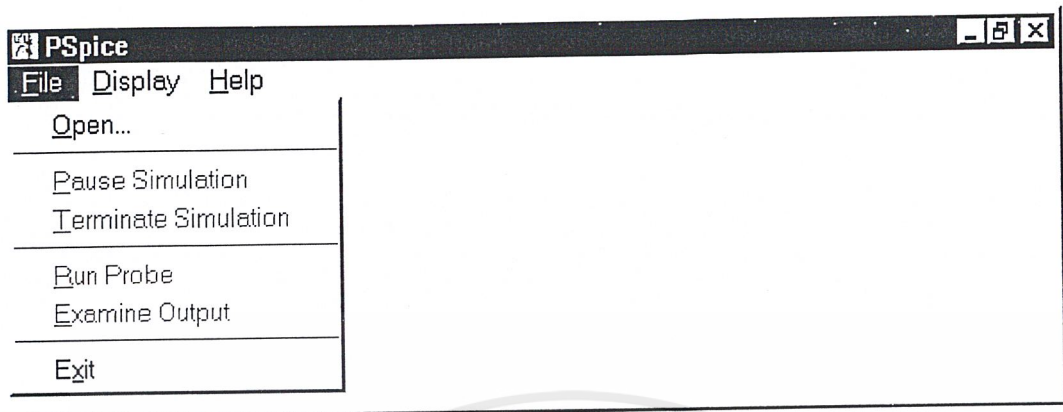
```

Untitled* - MicroSim Text Editor
File Edit Search View Insert Help
[Icons]
.op
TEMP 27
R1 3 1 5k
R2 0 4 1k
R3 0 2 4.7k
R4 2 1 47k
R5 0 VO 1k
C1 3 VO 1u
C2 Vin 2 1u
C3 0 4 10u
Q1 3 2 4 Q2N3904
V1 Vin 0 AC 1m SIN 0 1m 1k 0 0 0
V2 1 0 DC 12
***** BJT MODEL PARAMETER
.MODEL Q2N3904 NPN (IS=6.734000E-15 BF=416.4 NF=1 VAF=74.03
+IKF=.6678 ISE=6.73400E-15 NE=1.259 BR=.7371 NR=1 RB=10
+=RBM=10 RC=1 CJE=4.493000E-12 MJE=.2593 CJC=3.638000E-12
+TR=239.500000E-09 XTB=1.5

**** Analysis setup
.AC DEC 101 1 10G
.TRAN 20nS 2m
.PROBE
.OP
For Help, press F1
Ln 27, Col 4
CAP NUM
    
```

รูปที่ จ.20 เพิ่มข้อมูลที่ได้จากบรรยายวงจรด้วยข้อความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ จ.21 หน้าต่างโปรแกรม Pspice

ขั้นที่ 2 ขั้นการวิเคราะห์วงจรจากเพิ่มข้อมูลที่เขียนบรรยายอุปกรณ์ดังรูปที่ จ.20 โดยการ  
ใช้โปรแกรม PSPICE.EXE ซึ่งเป็นไอคอนในไดเรกทอรี หรือเปิดจากเมนู Simulate ได้เช่นกัน  
ซึ่งจะได้หน้าต่างดังรูปที่ จ.21 จากนั้นเปิดเพิ่มข้อมูลที่จะวิเคราะห์ (มีส่วนขยายเป็น .CIR) หลัง  
จากนั้นโปรแกรมจะประมวลผลอัตโนมัติและจะได้ผลเช่นเดียวกับหน้าต่างของวิธีแรกในรูปที่ จ.14

ขั้นที่ 3 เปิดเพิ่มข้อมูลที่แสดงผล (มีส่วนขยายเป็น .DAT) หลังจากนั้นจะได้ผลเช่นเดียว  
กับหน้าต่างด้านล่างของวิธีแรกในรูปที่ จ.14 และเช่นเดียวกัน วิธีการใช้คำสั่งก็เหมือนกันทุก  
ประการ

สำหรับข้อกำหนดรายละเอียดต่าง ๆ ของโปรแกรมผู้อ่านสามารถหาอ่านได้จากคู่มือ  
โปรแกรม Pspice โดยทั่วไปและตามที่ได้อธิบายมาทั้งหมดหวังว่าจะเป็นแนวทางให้ผู้เริ่มใช้  
โปรแกรมได้ในระดับหนึ่ง สำหรับโปรแกรมในรุ่นอื่น ๆ ก็มีการใช้งานที่มีลักษณะคล้าย ๆ กัน

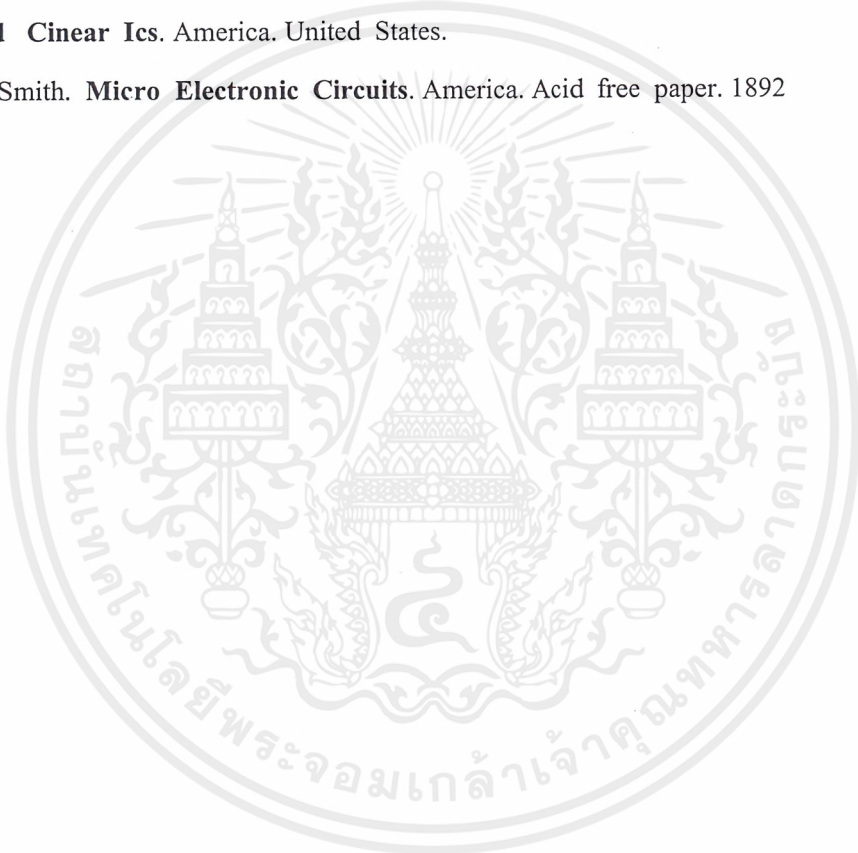
## บรรณานุกรม

กิติพงศ์ มะโน. วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพฯ : งานตำราและเอกสารการพิมพ์ คณะครู  
 ศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2542.

พิชัย ภักดีพานิชเจริญ. คู่มือการออกแบบวงจรกรองสัญญาณความถี่. กรุงเทพฯ : ไสค์ส์เซ็นเตอร์.

Robert F. Couglin and Robert s. 1989. **viccanveei. Intriuctor operaitanal Amptifiers  
 and Cinear Ics.** America. United States.

Sedra and Smith. **Micro Electronic Circuits.** America. Acid free paper. 1892



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญานิพนธ์	นายปิยะ โขพิมพ์
วันเดือนปีเกิด	4 ธันวาคม 2520
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
ภูมิลำเนาเดิม	21/1 หมู่ 12 ต.วังชัย อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น 40140
ที่อยู่ปัจจุบัน	21/1 หมู่ 12 ต.วังชัย อ.น้ำพอง จ.ขอนแก่น 40140
โทรศัพท์	043-431087 01-2596442
<b>ประวัติการศึกษา</b>	
ประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านเสียวโคกกกลาง
มัธยมตอนต้น	โรงเรียนน้ำพองศึกษา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคขอนแก่น
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับรางวัล	-
ทุนการศึกษา	-
คติพจน์	งานทุกสิ่งทุกอย่างจะสำเร็จได้อยู่ที่ตัวเรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปฏิญานิพนธ์

นายไพโรจน์ ปันสุข

วันเดือนปีเกิด

10 มิถุนายน 2520

สถานที่เกิด

จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ภูมิลำเนาเดิม

73/1 หมู่ 7 ต.ปลายกุด อ.บางซ้าย

จ.พระนครศรีอยุธยา 13270

ที่อยู่ปัจจุบัน

73/1 หมู่ 7 ต.ปลายกุด อ.บางซ้าย

จ.พระนครศรีอยุธยา 13270

โทรศัพท์

01-8531135

ประวัติการศึกษา

ประถมศึกษา

โรงเรียนวัดเสวตศีลาราม

มัธยมตอนต้น

โรงเรียนบางซ้ายวิทยา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)

วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา

ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)

วิทยาลัยเทคนิคพระนครศรีอยุธยา

ปริญญาตรี

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

ผลงานที่ได้รับรางวัล

-

ทุนการศึกษา

-

คติพจน์

ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญานิพนธ์	นายมนูญ ขุนอนันท์
วันเดือนปีเกิด	15 กรกฎาคม 2520
สถานที่เกิด	จังหวัดพัทลุง
ภูมิลำเนาเดิม	147 หมู่ 11 ต.หารโพธิ์ อ.เขาชัยสน จ.พัทลุง 93130
ที่อยู่ปัจจุบัน	147 หมู่ 11 ต.หารโพธิ์ อ.เขาชัยสน จ.พัทลุง 93130
โทรศัพท์	-
ประวัติการศึกษา	
ระดับศึกษา	โรงเรียนไทยรัฐวิทยา 23 (วัดโคกโหนด)
มัธยมตอนต้น	โรงเรียนห่านโพธิ์พิทยาคม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคพัทลุง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ สงขลา
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับรางวัล	-
ทุนการศึกษา	-
คติพจน์	มุ่งหวังสิ่งใด ตั้งใจสิ่งนั้น ฝ่าฟันให้ถึงจุดหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อผู้ทำปริญญาบัตร	นางสาวศศิธร พรประสิทธิ์
วันเดือนปีเกิด	13 มกราคม 2521
สถานที่เกิด	จังหวัดสิงห์บุรี
ภูมิลำเนาเดิม	146/1 หมู่ 5 ต.พระจอม อ.พรหมบุรี จ.สิงห์บุรี 16120
ที่อยู่ปัจจุบัน	146/1 หมู่ 5 ต.พระจอม อ.พรหมบุรี จ.สิงห์บุรี 16120
โทรศัพท์	036-599180 01-3332617
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนนรพิทยา
มัธยมตอนต้น	โรงเรียนท่าช้างวิทยาคม
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.)	วิทยาลัยเทคนิคสิงห์บุรี
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)	วิทยาลัยเทคนิคสิงห์บุรี
ปริญญาตรี	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
ผลงานที่ได้รับรางวัล	-
ทุนการศึกษา	-
คติพจน์	คำคุณคือกำลังใจของตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้