อุปกรณ์บีบอัดสัญญาณเสียงแบบหลายย่านความถี่

MULTIBANDCOMPRESSOR

โดย

นายถวัลย์ สมบูรณ์ รหัสประจำตัวB5325306

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427494 โครงงานวิศวกรรมโทรคมนาคม

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2546

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 3ปีการศึกษา 2556

Multiband Compressor

คณะกรรมการสอบโครงงาน

_____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา)

ที่ปรึกษาโครงงาน

_____

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก)

กรรมการ

_____

(อ.ดร.ธนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับรายงานโครงงานฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่ง ของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาโทรคมนาคม รายวิชา427494โครงงานวิศวกรรม โทรคมนาคมประจำปีการศึกษา2556

หัวข้อโครงงาน การบีบอัดสัญญาณเสียงแบบหลายย่านความถี่ (MultibandCompressor)

จัดทำโดย นายถวัลย์สมบูรณ์

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาคการศึกษาที่ 3/2556

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันได้มีสถานีวิทยุกระจายเสียงในระบบ FM เกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่แล้วสถานีวิทยุจะใช้เครื่องส่งวิทยุที่ไม่ผ่านการรับรองมาตรฐานจาก คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) จึงทำให้เกิดปัญหาในการส่งกระจายเสียง ทำให้เกิดการรบกวนในช่องความถี่ใกล้เคียง ซึ่งตามมาตรฐานของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงกำหนดให้มีค่า Peak Deviation ในขณะ Modulate จะต้องมีค่าไม่เกิน 75 kHz โดยค่า Peak Deviation จะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณ Input ถ้าสัญญาณแรงมากค่าจะส่งผลต่อค่า Peak Deviation สูงซึ่งจะทำให้เกินมาตรฐานที่กำหนด โดยทั่วไปการบีบอัดสัญญาณเสียงจะเป็นแบบบีบอัดสัญญาณทุกๆความถี่ในอัตราส่วนที่เท่ากันทำให้เกิดปัญหาคุณภาพเสียงของสัญญาณ Input ที่ต่ำ โดยช่วงความถี่ที่มีความแรงของสัญญาณไม่เกินขอบเขตที่กำหนดจะถูกลดทอนลงไปด้วยตัวอย่างเช่น หากมีขนาดของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ สูงกว่าขนาดสัญญาณความถี่กลางและความถี่สูงในรูปแบบการบีบอัดสัญญาณเสียงแบบเดิมจะทำการบีบอัดทุกๆ ย่านความถี่ในอัตราส่วนที่เท่ากัน จึงทำให้ความถี่สูงและความถี่กลางมีขนาดลดลงตามไปด้วยซึ่งทำให้เกิดปัญหาคุณภาพเสียงที่ต่ำ ดังนั้นในโครงงานนี้เราจึงทำอุปกรณ์บีบอัดสัญญาณเสียง แบบหลายย่านความถี่ (Multiband Compressor) เพื่อแก้ปัญหาที่กำลังเกิดขึ้นในปัจจุบัน

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานเรื่องการบีบอัดสัญญาณเสียง แบบหลายย่านความถี่ (Multiband Compressor) สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากผู้จัดทำโครงงานได้รับความช่วยเหลือด้านต่างๆจากผศ.ดร. รังสรรค์ทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน และ นายปัญญา หันตุลา นักศึกษาบัณฑิตศึกษา ผู้ที่เป็นแนวความคิดริเริ่มในหัวข้อโครงงานเรื่องการบีบอัดสัญญาณเสียง แบบหลายย่านความถี่ (Multiband Compressor)ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือสนับสนุน และให้คำปรึกษาในทุกๆ ด้านแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด และขอขอบพระคุณคณาจารย์ บุคลากรนักศึกษาบัณฑิตศึกษาสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำ นอกจากนี้คณะผู้จัดทำโครงงานขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือคณะผู้จัดทำในด้านต่างๆ

ผู้จัดทำโครงงานใคร่ขอขอบพระคุณทุกๆท่านที่ได้กล่าวไปแล้วไว้ ณ ที่นี้ สำหรับส่วนดีของโครงงานชิ้นนี้ ขออุทิศให้แก่คณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำโครงงาน หากโครงงานชิ้นนี้มีข้อผิดพลาดประการใดทางคณะผู้จัดทำโครงงานใคร่ขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นายณวัลย์ สมบูรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ ก

กิตติกรรมประกาศ ข

สารบัญ ค

สารบัญภาพ ฉ

บทที่1 บทนำ

1.1 ปัญหาและที่มา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตการทำงาน 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน 2

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

2.1 บทนำ 3

2.2 Sallen-key Low Pass Filter 4

2.3 Sallen-key Band Pass Filter 6

2.4 Sallen-key High Pass Filter 7

2.5 หลักการทำงานของวงจรบีบอัดสัญญาณเสียง(Compressor) 8

2.5.1 การปรับค่าของ Compressor 9

2.5.2 การใช้ Compressor 11

2.6Level Detector 11

2.7วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier) 12

2.8หลักการพื้นฐานของออปแอมป์ 13

2.8.1 วงขยายแบบกลับเฟส 15

2.9หลักการพื้นฐานของทรานซิสเตอร์ 16

2.9.1 ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ 18

2.9.2 ทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องขยาย 19

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบโครงงาน

3.1 บทนำ 20

3.2 องค์ประกอบและหลักการทำงานของMultiband Compressor 20

3.3 วงจรSallen-Key Low Pass Filter 21

3.4 วงจรSallen-key Band Pass Filter 23

3.5 Sallen-key High Pass Filter 26

3.6 วงจรCompressor 28

3.7 วงจร Level Detector 29

3.8วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier) 30

3.9 วงจรSallen-key Low Pass Filter 30

3.10แบบวงจรรวม Multiband Compressor 32

บทที่4 ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ 34

4.2 ผลการทดสอบวงจรSallen-Key Low Pass Filter 34

4.2.1 วิธีการหาความถี่ของวงจรSallen-Key Low Pass Filter 400 Hz 34

4.2.2 วิธีการคำนวณหาCutoff Frequency

ของ Sallen-Key Low Pass Filter 400 Hz 35

4.3 ผลการทดสอบวงจรSallen-Key Band Pass Filter 36

4.3.1 วิธีการหาความถี่

ของวงจร Sallen-Key Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHz 36

4.3.2 วิธีการคำนวณหาCutoff Frequency

ของ Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHz 37

4.4 ผลการทดสอบวงจรSallen-Key High Pass Filter 38

4.4.1 วิธีการหาความถี่

ของวงจร Sallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz ขึ้นไป 38

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4.2 วิธีการคำนวณหาCutoff Frequency
ของ Sallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz 39

4.5 ผลการทดสอบวงจรLevel Detector 40

4.5.1 วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันVp-p
ของสัญญาณ Input และสัญญาณ DC 40

4.6 ผลการทดสอบวงจรCompressor 42

4.7วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier) 45

4.8 ผลการทดสอบวงจรSallen-Key Low Pass Filter 46

4.8.1 วิธีการหาความถี่ของวงจรSallen-Key Low Pass Filter 30 kHz 46

4.8.2 วิธีการคำนวณหาCutoff Frequency
ของ Sallen-Key Low Pass Filter 30 kHz 47

4.9 ผลการทดสอบวงจรMultiband Compressor 48

4.9.1 วิธีการหาความถี่ของวงจรMultiband Compressor 48

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบ 55

5.2สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงงาน 56

5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 56

ประวัติผู้เขียน 57

ภาคผนวก 58

บรรณานุกรม 83

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ FM 4
2.2 ผลการตอบสนองความถี่ 5
2.3 วงจร Sallen-key Low Pass Filter 5
2.4 ผลการตอบสนองความถี่ 6
2.5 วงจร Sallen-key Band Pass Filter 7
2.6 ผลการตอบสนองความถี่ 7
2.7 วงจร Sallen-key High Pass Filter 8
2.8 หลักการทำงานของ Compressor 8
2.9 กราฟอธิบายลักษณะการทำงานของ Knee 10
2.10 ส่วนต่างๆของ Waveform 11
2.11 วงจร Level Detector 12
2.12 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ 12
2.13 ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ออปแอมป์ 13
2.14 ลักษณะของวงจรสมบูรณ์ของออปแอมป์ในอุดมคติ 14
2.15 วงจรขยายแบบกลับเฟส 16
2.16 ทรานซิสเตอร์ใช้ในความถี่สูง 16
2.17 ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP 17
2.18 ทรานซิสเตอร์ใช้เป็นสวิตช์ 18
2.19 ทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องขยาย 19
3.1 บล็อกไดอะแกรม Multiband Compressor 21
3.2 วงจร Sallen-Key Low Pass Filter 21
3.3 วงจร Sallen-Key Low Pass Filter 2 ตัว 22
3.4 ค่า Cutoff Frequency วงจร Sallen-Key Low Pass Filter 23
3.5 วงจร Sallen-key Band Pass Filter 23
3.6 วงจร Sallen-Key Band Pass Filter 24
3.7 ค่า Cutoff Frequency วงจร Sallen-key Band Pass Filter 25

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.8	วงจร Sallen-key High Pass Filter	26
3.9	วงจร Sallen-Key High Pass Filter 2 ตัว	27
3.10	ค่า Cutoff Frequency วงจร Sallen-Key High Pass Filter	27
3.11	วงจร Compressor	28
3.12	วงจร Level Detector	29
3.13	วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ	30
3.14	วงจร Sallen-key Low Pass Filter	31
3.15	วงจร Sallen-Key Low Pass Filter 2ตัว	31
3.16	วงจร Sallen-key Low Pass Filter	32
3.17	Multiband Compressor	32
3.18	อุปกรณ์ Multiband Compressor	33
4.1	วงจรSallen-Key Low Pass Filter 400 Hz	34
4.2	แสดงกราฟSallen-Key Low Pass Filter 400 Hz	35
4.3	Cutoff Frequencyของวงจร Sallen-Key Low Pass Filter 400 Hz	36
4.4	วงจรSallen-Key Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHz	36
4.5	แสดงผลการทดสอบ Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHz	37
4.6	Cutoff Frequencyของวงจร Sallen-Key Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHz	38
4.7	วงจรSallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz	39
4.8	แสดงผลการทดสอบ Sallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz	39
4.9	Cutoff Frequencyของวงจร Sallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz	40
4.10	แสดงขั้นตอนการหา Level Detector	41
4.11	แสดงผลการทดสอบ Level Detector สัญญาณเสียงต่ำ	41
4.12	แสดงผลการทดสอบLevel Detector สัญญาณเสียงกลาง	41
4.13	แสดงผลการทดสอบLevel Detector สัญญาณเสียงสูง	42
4.14	แสดงขั้นตอนการหา Compressor	42

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.15 แสดงกราฟการหาCompressorสัญญาณเสียงต่ำ 43
4.16 แสดงกราฟการหาอัตราการบีบอัดสัญญาณเสียงต่ำ 43
4.17 แสดงกราฟการหาCompressorสัญญาณเสียงกลาง 44
4.18 แสดงกราฟการหาอัตราการบีบอัดสัญญาณเสียงกลาง 44
4.19 แสดงกราฟการหาCompressorสัญญาณเสียงสูง 44
4.20 แสดงกราฟการหาอัตราการบีบอัดสัญญาณเสียงสูง 45
4.21 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ 45
4.22 วงจรSallen-KeyLow Pass Filter 30 kHz 46
4.23 แสดงผลการทดสอบ Sallen-Key Low Pass Filter 30 kHz 47
4.24 Cutoff Frequencyของวงจร Sallen-Key Low Pass Filter 30 kHz 48
4.25 ทดสอบวงจร Multiband Compressor 49
4.26 การทดสอบ Multiband Compressor 49
4.27 แสดงผลการทดสอบ Multiband Compressor 50
4.28 การทดสอบ Multiband Compressor 50
4.29 แสดงผลการทดสอบ Non-Compressor สัญญาณเสียงต่ำ 51
4.30 แสดงผลการทดสอบ Compressor สัญญาณเสียงต่ำ 51
4.31 การทดสอบ Multiband Compressor สัญญาณเสียงกลาง 52
4.32 แสดงผลการทดสอบ Non-Compressor สัญญาณเสียงกลาง 52
4.33 แสดงผลการทดสอบ Compressor สัญญาณเสียงกลาง 53
4.34 การทดสอบ Multiband Compressor สัญญาณเสียงสูง 53
4.35 แสดงผลการทดสอบ Non-Compressor สัญญาณเสียงสูง 54
4.36 แสดงผลการทดสอบ Compressor สัญญาณเสียงสูง 54

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่1

บทนำ

1.1ปัญหาและที่มาของโครงงาน

ในปัจจุบันได้มีสถานีวิทยุกระจายเสียงในระบบ FMเกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่แล้วสถานีวิทยุจะใช้เครื่องส่งวิทยุที่ไม่ผ่านการรับรองมาตรฐานจาก คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ(กสทช.)จึงทำให้เกิดปัญหาในการส่งกระจายเสียง ทำให้เกิดการรบกวนในช่องความถี่ใกล้เคียง ซึ่งตามมาตรฐานของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงกำหนดให้มีค่า Peak Deviationในขณะ Modulateจะต้องมีค่าไม่เกิน 75 kHz โดยค่าPeak Deviationจะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณ Input ถ้าสัญญาณแรงมากค่าจะส่งผลต่อค่า Peak Deviation สูงซึ่งจะทำให้เกินมาตรฐานที่กำหนดโดยทั่วไปการบีบอัดสัญญาณเสียงจะเป็นแบบบีบอัดสัญญาณทุกๆความถี่ในอัตราส่วนที่เท่ากันทำให้เกิดปัญหาคุณภาพเสียงของสัญญาณ Input ที่ต่ำโดยช่วงความถี่ที่มีความแรงของสัญญาณไม่เกินขอบเขตที่กำหนดจะถูกลดทอนลงไปด้วยตัวอย่างเช่น หากมีขนาดของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ สูงกว่าขนาดสัญญาณความถี่กลางและความถี่สูงในรูปแบบการบีบอัดสัญญาณเสียงแบบเดิมจะทำการบีบอัดทุกๆ ย่านความถี่ในอัตราส่วนที่เท่ากันจึงทำให้ความถี่สูงและความถี่กลางมีขนาดลดลงตามไปด้วยซึ่งทำให้เกิดปัญหาคุณภาพเสียงที่ต่ำดังนั้นในโครงงานนี้เราจึงทำอุปกรณ์บีบอัดสัญญาณเสียงแบบหลายย่านความถี่ (Multiband Compressor) มีหลักการทำงานคือ จะแบ่งช่วงความถี่ในการบีบอัดสัญญาณเสียงเป็น 3 ช่วงความถี่ คือ 1.ช่วงความถี่ไม่เกิน 400 Hz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ต่ำ 2.ช่วงความถี่ 400Hz ถึง 1.3kHz ซึ่งเป็นช่วงความถี่กลาง 3.ช่วงความถี่ 1.3kHz ขึ้นไปซึ่งเป็นช่วงความถี่สูงจะบีบอัดสัญญาณเสียงใน 3 ย่านความถี่แบบอิสระต่อกัน เพื่อบีบอัดสัญญาณเสียง Input ที่เข้ามาไม่ให้มีความแรงเกินไป ซึ่งจะทำให้ค่า Peak Deviationในขณะ Modulate มีค่าไม่เกิน 75 kHz จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาอุปกรณ์บีบอัดสัญญาณเสียงแบบหลายย่านความถี่ (Multiband Compressor) เพื่อให้ได้คุณภาพเสียงที่ดีขึ้นและช่วยแก้ไขปัญหาที่กำลังเกิดขึ้นในปัจจุบัน

1.2วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.ศึกษามาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับการทดสอบประกอบกิจการกระจายเสียง

2. เพื่อศึกษาวิธีการทำงานMultiband Compressor
3. เพื่อสร้างอุปกรณ์ MultibandCompressorสำหรับใช้บีบอัดสัญญาณเสียง ก่อนทำการ Modulate ในระบบ FM

1.3ขอบเขตการทำงาน

1. สามารถออกแบบวงจร MultibandCompressorเพื่อให้ได้ผลเป็นไปตามทฤษฎี
2. เพื่อให้ได้อุปกรณ์ Multiband Compressorสำหรับบีบอัดสัญญาณเสียงเพื่อไม่ให้ค่า Peak Deviation เกิน 75 kHz

1.4ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษามาตรฐานทางเทคนิคและปัญหาของเครื่องส่งวิทยุกระจายเสียงสำหรับการทดสอบประกอบกิจการกระจายเสียง
2. ศึกษาหลักการทำงานของ MultibandCompressor
3. ออกแบบวงจรMultibandCompressor
4. สร้างวงจรMultibandCompressorและทดสอบวงจรในห้องปฏิบัติการ
5. วิเคราะห์และปรับปรุงแก้ไขวงจร
6. รวบรวมข้อมูลและขั้นตอนการทำงานทั้งหมดเพื่อจัดทำเอกสาร
7. นำเสนอโครงงาน

1.5ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงงาน

1. ได้อุปกรณ์บีบอัดสัญญาณเสียงแบบหลายย่านความถี่
2.ได้นำความรู้มาประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

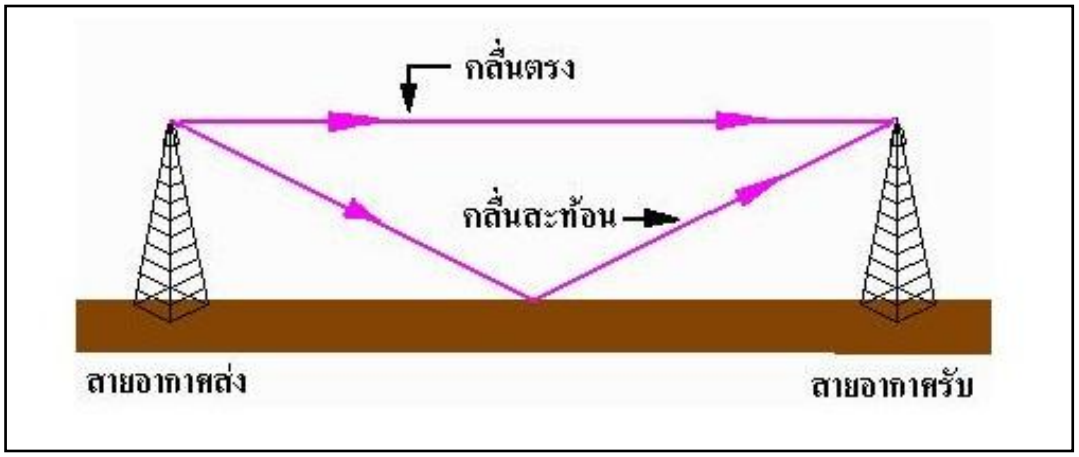
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการทำการโครงงานนี้โดยในส่วนนี้จะมีหลักการทำงานของ 1. วงจรSallen-KeyLow Pass Filter2.วงจรSallen-key Band Pass Filter 3. วงจรSallen-Key High Pass Filter 4.วงจร Level Detector 5.วงจร Compressor6.วงจร Summing-Amplifier,ออปแอมป์และทรานซิสเตอร์ที่เราได้นำมาประยุกต์ใช้กับโครงงานนี้

ระบบการส่งวิทยุกระจายเสียงที่ผ่านมาในอดีตเริ่มจากการเปลี่ยนเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้าในระบบอนาล็อก (Analog) แล้วนำสัญญาณเสียงผสมกับคลื่นความถี่วิทยุทำการส่งออกอากาศ การส่งวิทยุกระจายเสียงยุคแรกเป็นการส่งระบบ AM (Amplitude Modulation) ต่อมามีการพัฒนาการส่งวิทยุกระจายเสียงในระบบ FM (Frequency Modulation)เป็นการผสมสัญญาณเสียงกับคลื่นวิทยุโดยใช้เทคนิคเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นวิทยุทำให้คุณภาพเสียงดีในการรับฟังจากเครื่องรับวิทยุดีขึ้นกว่าการรับฟังในระบบ AM ส่งกระจายเสียงในย่านความถี่ VHF(88-108 MHz) และในปัจจุบันได้มีการเปลี่ยนการส่งวิทยุกระจายเสียงเป็นระบบดิจิตอล (Digital) สัญญาณเสียงจะถูกเข้ารหัสเป็นสัญญาณระบบดิจิตอลและผสมกับคลื่นวิทยุทำการส่งออกอากาศ การส่งวิทยุกระจายเสียง FM ความถี่ 88-108 MHz คลื่นวิทยุที่มีความถี่ย่านนี้จะแพร่กระจายคลื่นเป็นแนวเส้นตรง ดังนั้นถ้าให้คลื่นวิทยุแพร่กระจายไปบนพื้นโลกสามารถไปได้ไกลประมาณ 60–70 กิโลเมตรจากสถานีส่ง เนื่องจากคลื่นวิทยุจะเดินทางไปพบกับส่วนโค้งของโลกทำให้บริเวณที่อยู่เลยถัดไปไม่อาจรับคลื่นวิทยุนี้ได้ ดังนั้นบริเวณพื้นโลกที่จะได้รับฟังคลื่นวิทยุกระจายเสียงจึงอยู่ไกลไม่เกิน 60-70 กิโลเมตร จากสถานีส่ง แต่ก็เป็นคลื่นวิทยุที่มีแรงคงที่

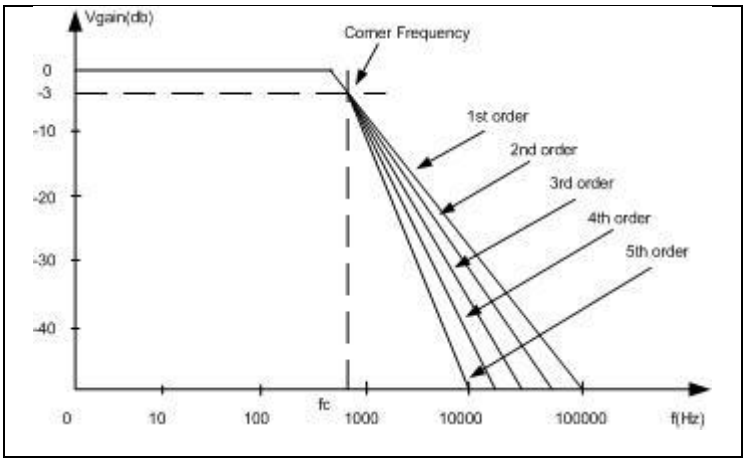


รูปที่ 2.1การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ FM

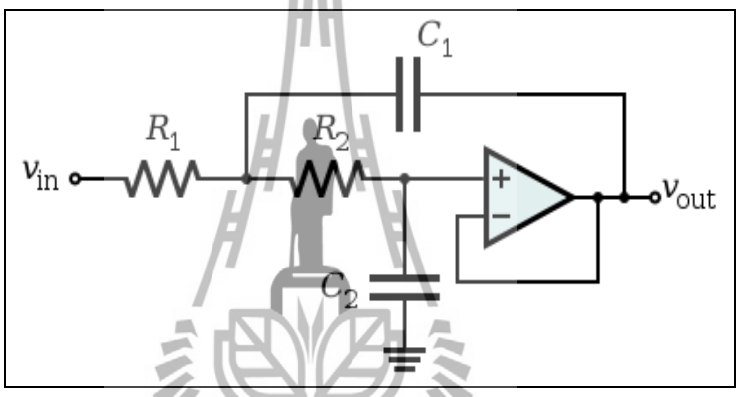
จากรูปที่ 2.1 คลื่นตรงมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นวิทยุเหมือนกับการเดินทางของแสง คือ พุ่งเป็นเส้นตรง และการกระจายคลื่นชนิดนี้จะอยู่ในระดับสายตา (Line of Sight)และหากบังคับให้คลื่นวิทยุย่าน VHF พุ่งขึ้นไปบนฟ้าก็จะทะลุชั้นบรรยากาศที่หุ้มห่อโลกไปไม่สะท้อนหรือโค้งตกลงมาสู่พื้นโลก เป็นประโยชน์สำหรับการติดต่อกับดาวเทียมสื่อสารซึ่งทำหน้าที่ถ่ายทอดสัญญาณโทรเลข โทรศัพท์ และโทรทัศน์ กลับลงมาสู่พื้นโลกได้อีก

2.2Sallen-key Low Pass Filter

วงจรกรองความถี่ต่ำจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน DC ไปจนถึงความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) แทนด้วยเครื่องหมาย fc ความถี่คัตออฟคือความถี่ ณ ขณะที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ (- 3 dB) บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่า ความถี่มุม (Corner Frequency) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกิน fc ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมาก ๆ จากในรูปเส้นประแสดงถึงผลในทางอุดมคติ ส่วนเส้น ทึบแสดงถึงผลของวงจรในทางความเป็นจริง ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (Pass Band)และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน (Stop band)ดังรูปภาพที่ 2.2



รูปที่ 2.2ผลการตอบสนองความถี่



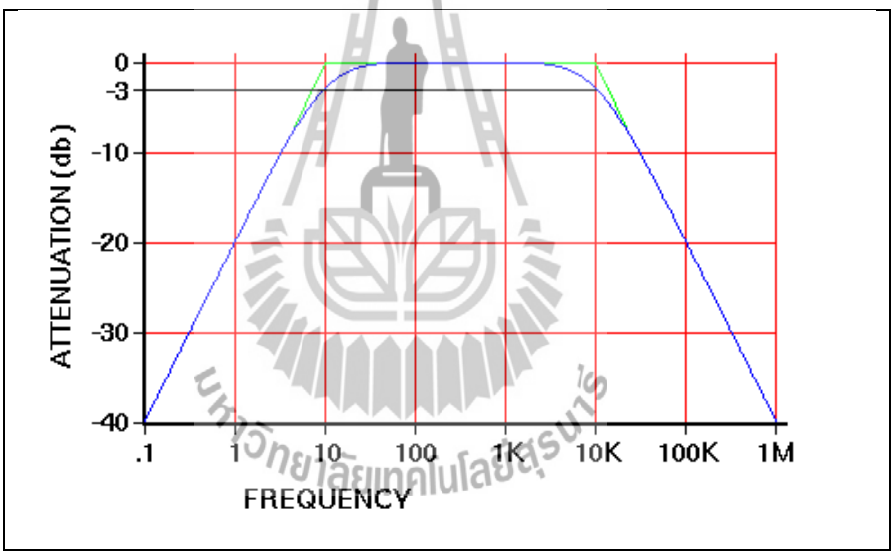
รูปที่ 2.3วงจรSallen-key Low Pass Filter

จะสามารถคำนวณหาค่า R1, R2 ,C1 และ C2 ได้จากสมการดังนี้

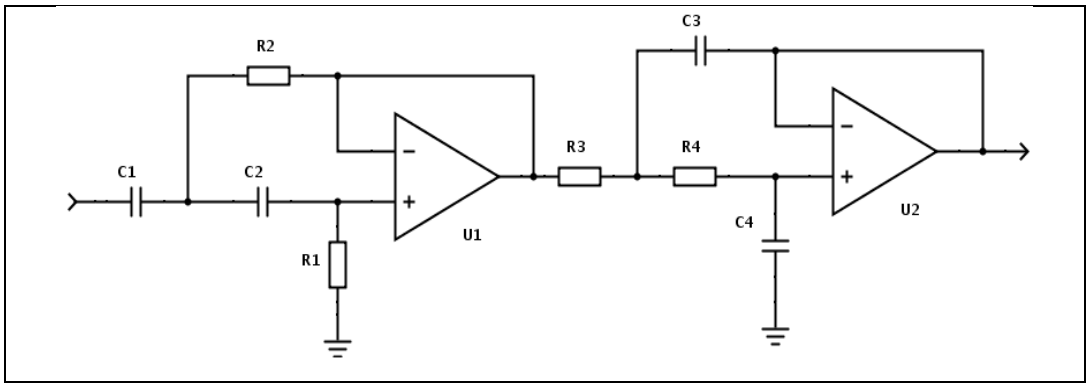
$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C1C2}} \quad \text{.....(2.1)}$$

2.3Sallen-key Band Pass Filter

วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter: BPF) หมายถึง วงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงจะยอมให้สัญญาณผ่านไปได้ เฉพาะช่วง ที่กำหนดเท่านั้นความถี่ที่นอกเหนือจาก ที่กำหนดไว้จะถูกลดทอน ไปวงจรกรองความถี่จะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน DC ไปจนถึงความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) แทนด้วยเครื่องหมาย fc ความถี่คัตออฟคือความถี่ ณ ขณะที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ (- 3 dB) บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่า ความถี่มุม (Corner Frequency) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกิน และต่ำเกินไปกว่าค่าที่กำหนด fc ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมาก ๆ จากในรูปเส้น สีเขียวแสดงถึงผลในทางอุดมคติ ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงผลของวงจรในทางความเป็นจริง ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (Pass Band) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน (Stop band) ดังรูปภาพที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลการตอบสนองความถี่



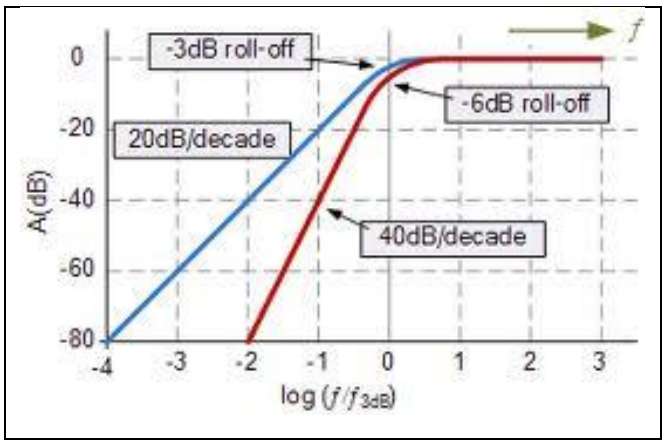
รูปที่ 2.5 วงจร Sallen-key Band Pass Filter

จะสามารถคำนวณหาค่า R1, R2 ,C1 และ C2 ได้จากสมการดังนี้

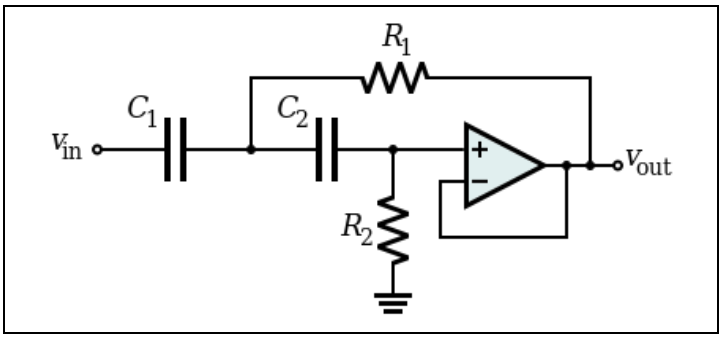
$$fc=\frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C1C2}} \quad \text{.....(2.1)}$$

2.4Sallen-key High Pass Filter

วงจรกรองสัญญาณความถี่สูง (High Pass Filter: HPF) หมายถึงวงจร ที่ยอมให้สัญญาณความถี่สูงผ่านและลดทอนสัญญาณความถี่ต่ำวงจรกรองความถี่ สูงจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่ความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency) เป็นต้นไปผ่านแทนด้วยเครื่องหมาย fc ความถี่คัตออฟคือความถี่ ณ ขณะที่อัตราขยายของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของอัตราขยายปกติ (- 3 dB) บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่า ความถี่มุม (Corner Frequency) ถ้ามีความถี่ที่ต่ำเกิน fc ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมาก ๆ จากในรูปเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงผลของวงจรในทางความเป็นจริง ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (Pass Band) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน (Stop band) ดังรูปภาพที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลการตอบสนองความถี่



รูปที่ 2.7 วงจร Sallen-key HighPass Filter

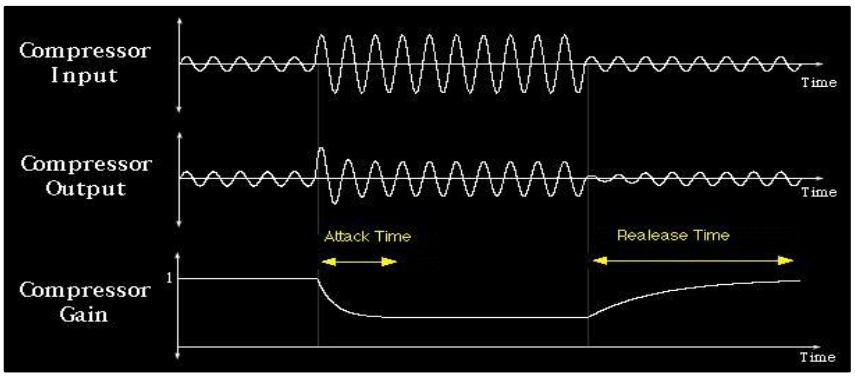
จะสามารถคำนวณหาค่า R1, R2 ,C1 และ C2 ได้จากสมการดังนี้

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C1C2}} \quad \text{.....(2.1)}$$

2.5หลักการทำงานของวงจรบีบอัดสัญญาณเสียง(Compressor)

การบีบอัดสัญญาณเสียง คือการบีบอัดหรือกดสัญญาณเสียงเวลาที่สัญญาณเสียงที่เข้ามาเกินกว่าระดับที่ตั้งเอาไว้ สัญญาณจะถูกลดขนาดลงมาในอัตราส่วนที่กำหนดเอาไว้ ส่วนเสียงที่ไม่เกินกว่าระดับที่ตั้งไว้ก็จะปล่อยออกไปตามปกติ หน้าที่ของ Compressor คือทำให้ระดับสัญญาณเสียงที่เบากับระดับเสียงที่ดังไม่ให้เกิดระยะห่างแตกต่างมากเกินไป

Compressor Inputคือสัญญาณที่เข้ามาก่อนที่ Compressor จะเริ่มทำงาน Compressor Output จะเป็นสัญญาณที่ออกมาหลังจากที่ Compressor ทำงานแล้วที่ Compressor Gain ตรงนี้จะแสดงการทำงานของ Compressor ให้ดูตรง AttackTime ตรงส่วนนี้จะเป็นช่วงเวลาที่ Compressor เริ่มทำงาน หากเราตั้งค่า Attack Time ไว้สูง มันก็จะค่อยๆกดสัญญาณเสียงลงมาส่วน Release Timeเป็นการแสดงการหยุดทำงานของ Compressor ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8หลักการทำงานของCompressor

2.5.1การปรับค่าของ Compressor

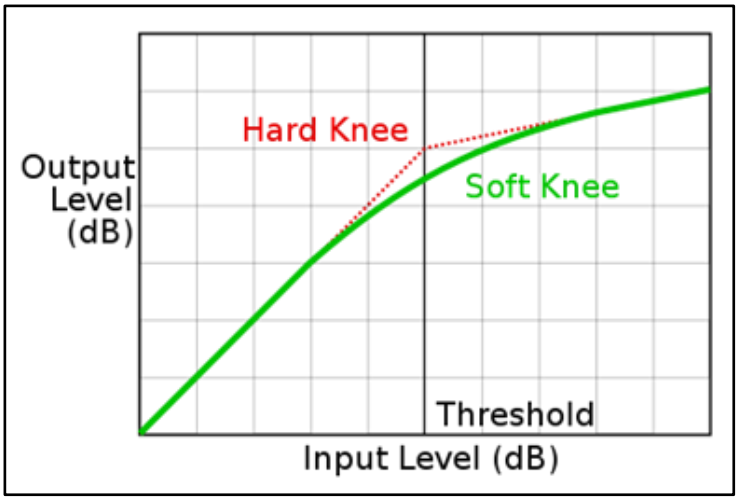
Threshold - เป็นค่าของระดับเสียง (dB) ที่ตั้งไว้เพื่อให้ Compressor เริ่มทำงานเมื่อระดับสัญญาณเกินค่า Thresholdที่ตั้งไว้ ก็จะเริ่มเกิดการ Compress ยิ่งค่า Threshold ตั้งไว้ต่ำมากเท่าไหร่ ก็จะทำให้เสียงถูกบีบมากยิ่งขึ้นเท่านั้น

Ratio –หากPlotเป็นกราฟ Ratio จะเป็นตัวกำหนดความชันของกราฟ ซึ่งจะเป็นตัวบอกอัตราส่วนระหว่างสัญญาขาออก ต่อ สัญญาณขาเข้า อย่างเช่นการตั้งไว้ 2:1 หากสัญญาณขาเข้าแรงเกินค่า threshold ที่ได้ตั้งไว้ทุก ๆ 2 dB สัญญาณขาออกจะเพิ่มขึ้นเพียง 1 dB เท่านั้น และ หากยิ่งปรับค่า Ratio เพิ่มมากยิ่งขึ้นเท่าไหร่ ก็จะทำให้ Compressor ทำหน้าที่คล้ายกับ Limiter มากยิ่งขึ้นเท่านั้น เช่น หากตั้ง threshold ไว้ที่ 0 และตั้ง ratio เป็น infinity ก็จะเป็นการกำหนดให้สัญญาณขาออกหยุดอยู่ที่ 2 dB เท่านั้น ไม่ว่าสัญญาณขาเข้าจะเพิ่มขึ้นเท่าไหร่ก็ตาม

Attack - เป็นตัวกำหนดให้ Compressor เริ่มทำงานช้าเร็วแค่ไหน เมื่อระดับเสียงเกินจุดthreshold หากตั้งไว้ต่ำ ก็จะทำให้เสียงช่วงเวลาหนึ่งที่เกินค่า threshold ผ่านไปได้โดยไม่มีการบีบอัดมักใช้ในการรักษา transient ของเสียง ไม่ให้ถูกบีบอัด ในขณะที่ตั้งค่า Attach ไว้ต่ำ ก็จะทำให้ Compressor ทำงานแทบจะในทันทีที่ ระดับเสียงเกินค่า Threshold เสียงที่ออกมาจะนุ่มราบเรียบเนื่องจากไม่มี Transient

Release - เป็นตัวกำหนดให้ Compressor หยุดทำงาน เมื่อสัญญาณต่ำกว่าระดับ Threshold ที่กำหนดไว้ การตั้งค่า Release ต่ำมาก ๆ จะทำให้เกิดเสียงในลักษณะ Choppy, Jittery โดยเฉพาะเครื่องดนตรีที่ผลิตเสียงความถี่ต่ำ เช่น กีตาร์เบส หากตั้งให้นานขึ้นอีกหน่อยก็จะทำให้ไม่เกิดอาการดังกล่าว การตั้งค่า Release นานมาก ๆ จะทำให้เกิดการบีบอัดเสียงในส่วนที่ไม่จำเป็น ทำให้เกิดการ "Squashing" เสียง

Hard Knee และ Soft Knee - ใช้เรียกลักษณะ Curve ณ. จุด Threshold, Kneeหมายถึงอัตราเร็วของการเริ่มบีบอัด หากตั้งไว้เป็น Hard Knee การบีบอัดจะเริ่มทันที เมื่อสัญญาณเกิดระดับ Threshold หากตั้งไว้เป็น Soft Knee การบีบอัดจะเริ่มทีละน้อย ซึ่งบางคนมักจะรู้สึกดีกว่า Knee แปลตรงๆตามตัวก็หมายถึง "หัวเข่า" ซึ่งก็คือช่วงงอ (ดังรูปที่ 2.5) อธิบายตามภาพ Hard Knee คือการงอแบบหักมุม (ตามเส้นประสีแดงในรูป) การปรับแบบนี้เหมาะกับเพลงเร็วๆ ส่วน Soft Knee คือการงอแบบโค้ง (ตามเส้นสีเขียวในรูป) การปรับแบบนี้ให้ความนุ่มนวลเหมาะกับเพลงช้า



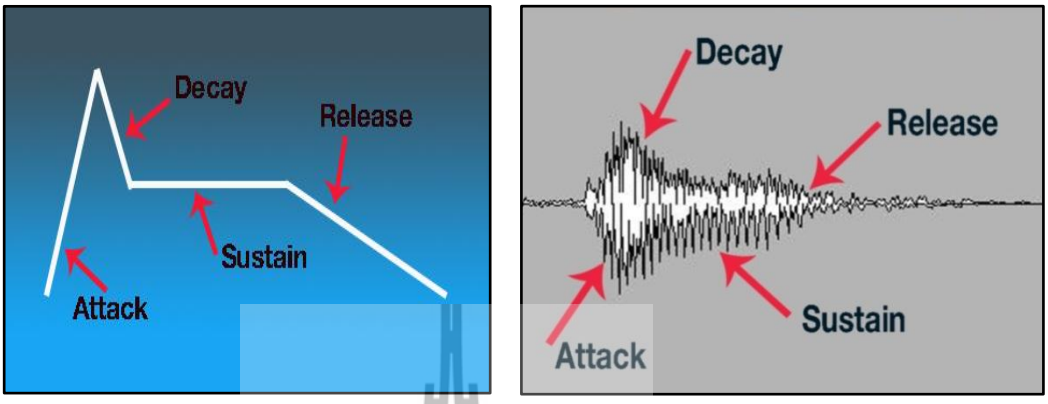
รูปที่ 2.9กราฟอธิบายลักษณะการทำงานของ Knee

Compressor Side Chain - เป็น Insert jack ที่พบอยู่บน Compressor เพื่อส่งสัญญาณเข้าขัดจังหวะสัญญาณที่ Compressor ใช้กำหนดการควบคุมระดับการบีบอัด หากไม่มีสัญญาณปล่อยเข้าไปใน Insert jack นี้ สัญญาณก็จะผ่านเข้า Compressorและทำงานตามปกติ แต่เมื่อไหร่ที่มีการส่งสัญญาณนี้เข้าไปก็จะทำให้ทางเดินเสียงที่ผ่าน Compressor ถูกตัดขาดการทำงานของ Side Chain จะคล้ายกันกับ "Effect Send" บน Console โดยผ่านสาย TRS ตัวอย่างเช่น สัญญาณที่ส่งเข้าไป อาจถูกส่งออกมาEQก่อนเพื่อต้องการลดเสียง "L" หรือ Sibilance หรือ De-Essingแล้วจึงส่งกลับเข้า Compressor สำหรับลักษณะการทำงานกับเสียงร้อง คือ จะใช้EQเพื่อเพิ่มระดับเสียงในความถี่ที่ไม่ต้องการขึ้น (เช่น ประมาณ 4 KHz) ซึ่งจะทำให้ระดับเสียง ณ ความถี่นั้นเกินค่า Threshold ทำให้ Compressor ทำงาน ดังนั้นเสียง ณ ความถี่ที่กำหนดจะถูกลดระดับเสียงลงมา และ ปล่อยให้ความถี่อื่น ๆ ผ่านไป ดังนั้นจึงเป็นการรักษาระดับ Dynamic ไว้และลดเสียงรบกวนที่ไม่ต้องการออกไป

ปริมาณของ Compressor - ในวงดนตรี Rock อาจมีการบีบอัดค่อนข้างสูง เช่น 10 dB ก็ยังดูเหมือนว่าไม่มาก ในทางปฏิบัติ คงไม่มีกฎตายตัวว่าจะต้องกำหนดว่าควรใช้มากน้อยแค่ไหน จุดนี้เองที่ทำให้การใช้ Compressor เป็นงานที่สร้างสรรค์สำหรับ Producer ตัวอย่างเช่น เราเคยได้ถกปัญหาเรื่องที่เกิดจากการใช้ Release Time ที่น้อยมาก แต่หากใช้ Release Time น้อย ควบคู่ไปกับค่า Attack ที่มาก (Slow Attack) ก็จะทำให้เกิดผลดี คือ ยอมให้ Transient ของกลองผ่านไปได้ และเกิด Pumping Effect ในตอนท้าย

2.5.2การใช้ Compressor

หลักการใช้ Compressor มีมาก Compressor / Limiter เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมระดับเสียงโดยการบีบอัดไม่ให้สัญญาณออกไปมีความแรงมากเกินไป รวมทั้งทำหน้าที่อื่นๆ ด้วย ก่อนจะศึกษาส่วนต่างๆของ Compressorเราต้องรู้ส่วนต่างๆของ Waveform ดังรูปที่ 2.10



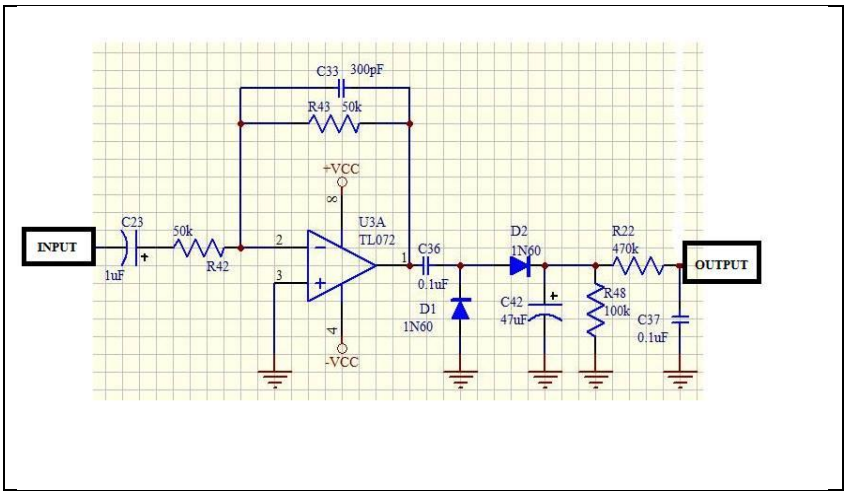
รูปที่ 2.10ส่วนต่างๆของ Waveform

- **Attack** คือช่วงที่ระดับความดังเริ่มต้นจากตำแหน่งสมดุลหรือตำแหน่งเริ่มต้นอาจเรียกอีกอย่างว่าช่วงเร่งความดังเข้าหาจุดสูงสุด
- **Decay** คือช่วงลดระดับความดังเข้าสู่ภาวะคงที่
- **Sustain** คือช่วงที่รักษาระดับความดังในเวลาหนึ่งอย่างสม่ำเสมอ
- **Release** คือช่วงเวลาที่ผ่อนระดับเสียงให้เบาลงจนเป็นเสียงเงียบไปในที่สุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.6Level Detector

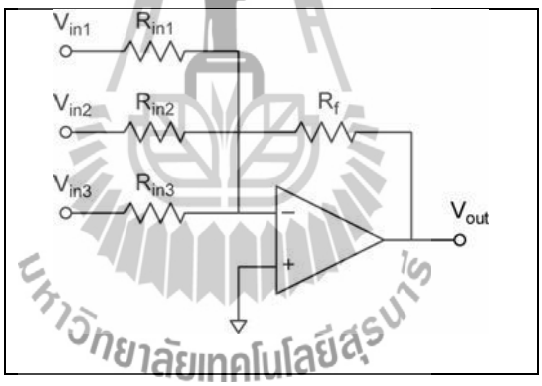
เป็นวงจรคล้ายกับวงจรHalf Wave โดยสัญญาณเสียงจะผ่านไดโอด ซึ่งจะทำหน้าที่ยอมให้สัญญาณ ที่อยู่ในฝั่งด้านบวกผ่านไปได้แล้วจะทำการกรองด้วยตัวเก็บประจุเพื่อทำให้เกิดแรงดัน DC คงที่และส่งเข้าไปในวงจรCompressorต่อไป



รูปที่ 2.11วงจรLevel Detector

2.7วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ คือ วงจรออปแอมป์ที่รวมอินพุตตั้งแต่ 2 อินพุตขึ้นไปมารวมกัน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ

พิจารณาจากรูป(สังเกตที่ขั้วบวก)จะได้

V(+)=0=V(-)

พิจารณาที่โนด V(-)จากKCL;

$$\left(\frac{V(-)-V1}{R1}+\frac{V(-)-V2}{R2}+\frac{V(-)-V3}{R3}+\frac{V(-)-V0}{Rf}\right)=0$$

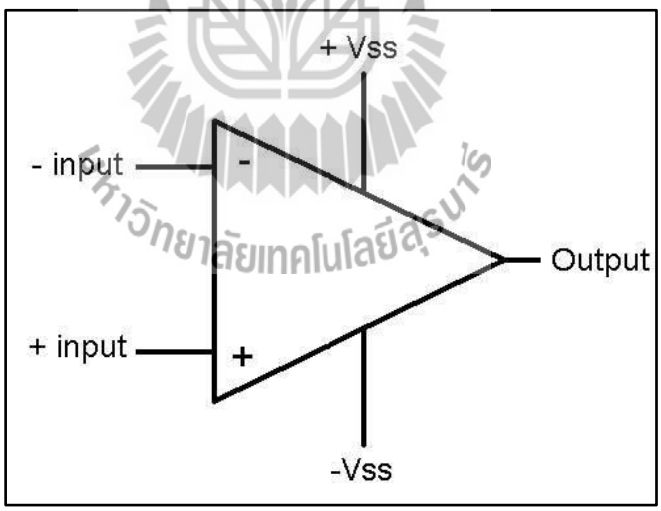
เมื่อแทนค่าV(-)ในสมการข้างต้น จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาท์พุต คือ

$$\left(\frac{-V1}{R1}+\frac{-V2}{R2}+\frac{-V3}{R3}+\frac{-V0}{Rf}\right)=0$$

$$Vo=-\left(\frac{Rf}{R1}V1+\frac{Rf}{R2}V2+\frac{Rf}{R3}V3\right) \quad \textbf{(2.2)}$$

2.8หลักการพื้นฐานของออปแอมป์

อุปกรณ์ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ที่สร้างขึ้นมาโดยโครงสร้างภายในนั้นจะประกอบด้วยสารกึ่งตัวอยู่หลายชนิด เช่น อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์อุปกรณ์มอสเฟต อุปกรณ์ไดโอดและยังมีตัวต้านทานโดยอุปกรณ์ทั้งหมดนี้จะถูกประกอบและต่อรวมกันที่อยู่ในรูปของวงจรรวมที่เรารู้ในชื่อที่เรียกว่า ไอซี ซึ่งวงจรรวมที่ได้จะมีลักษณะของวงจรเป็นวงจรขยายสัญญาณ โดยมีอัตราการขยายแรงดันที่สูงซึ่งเราสามารถเขียนสัญลักษณ์ของออปแอมป์ ที่แสดงถึงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ออปแอมป์ดังรูปที่ 2.13



รูปที่2.13ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ออปแอมป์

จากในรูปที่ 2.13จะเห็นถึงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ออปแอมป์ซึ่งคุณสมบัติโดยทั่วไปของออปแอมป์นั้นจะมีคุณสมบัติพื้นฐานดังนี้ คือ อินพุ ทอิมพีแดนซ์จะมีค่าที่สูงเอาต์พุทอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำ และอัตราขยายแรงดันจะมีค่าที่สูงมากดูจากลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์ออปแอมป์นั้นจะประกอบด้วยขาที่จะนำมาใช้งานดังต่อไปนี้คือ

- ขาอินพุตลบของออปแอมป์ โดยมีไว้เพื่อป้อนสัญญาณที่เป็นได้ทั้งสัญญาณไฟกระแสตรงและสัญญาณไฟกระแสสลับ ซึ่งสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าไปที่ขาอินพุทลบ

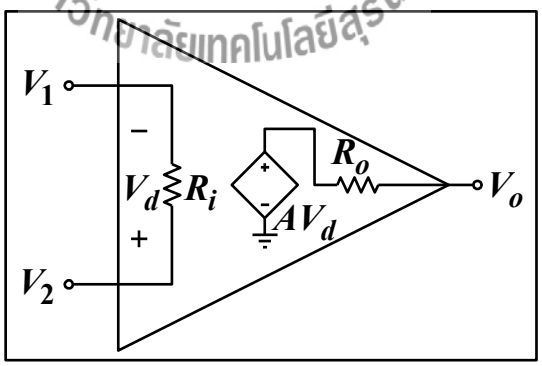
-ขาอินพุตบวกของออปแอมป์ โดยมีไว้เพื่อป้อนสัญญาณที่เป็นได้ทั้งสัญญาณไฟกระแสตรงและสัญญาณไฟกระแสสลับ ซึ่งสัญญาณที่ถูกป้อนเข้าไปที่ขาอินพุทบวก

- ขา เอาท์พุตโดยมีไว้เพื่อบอกถึงสภาวะการทำงานของออปแอมป์ ซึ่งจะเกิดขึ้นจากการที่เราทำการป้อนสัญญาณเข้าที่ขาอินพุททั้งสองของออปแอมป์

- ขาป้อนไฟบวก โดยจะมีค่าแรงดันไฟประมาณ 9โวลต์ ถึง 18โวลต์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราจะใช้แรงดันไฟประมาณ 15โวลต์

- ขาป้อนไฟลบ โดยจะมีค่าแรงดันไฟประมาณ - 9 โวลต์ ถึง -18 โวลต์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเราจะใช้แรงดันไฟประมาณ -15 โวลต์

การที่จะนำอุปกรณ์ออปแอมป์ไปใช้งานและมีการใช้งานที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้น เราจะต้องทำความเข้าใจในคุณสมบัติของออปแอมป์ดังต่อไปนี้ คือ คุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ ซึ่งก็สามารถที่จะเขียนวงจรสมบูรณ์ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14ลักษณะของวงจรสมบูรณ์ของออปแอมป์ในอุดมคติ

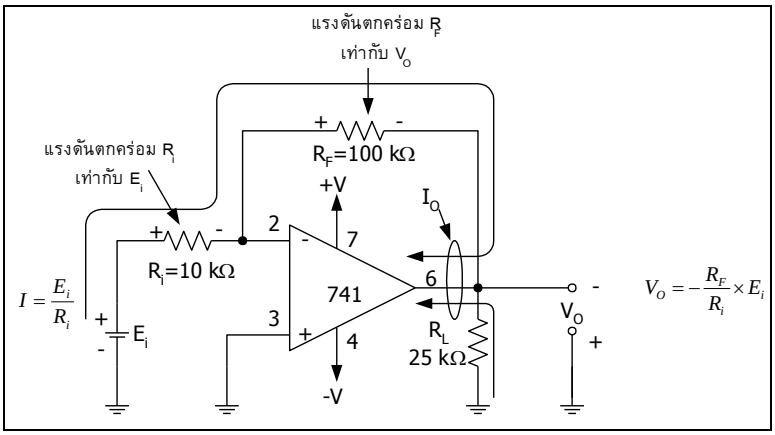
จากรูปที่ 2.13 จะเป็นลักษณะของวงจรสมบูรณ์ของออปแอมป์ในอุดมคติ ซึ่งถ้าพิจารณาดูแล้วก็จะเห็นว่าขาบวก(+) และขาลบ(-) นั้นต่อไม่ครบวงจร ซึ่งก็หมายความว่าค่าของกระแสที่ไหลเข้าขาอินพุทของออปแอมป์ทั้งสองขานั้นมีค่าเป็นศูนย์นั้นเอง หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือไม่มีกระแสที่ไหลเข้าที่ขาอินพุทของออปแอมป์ และถ้าเราพิจารณาถึงค่าของความต้านทานที่ขาอินพุทของออปแอมป์ หรือค่าความต้านทานอินพุทก็จะพบว่ามันจะมีค่าเป็นอนันต์ และในส่วนของอัตราขยายแรงดันลูปเปิด หรือที่เราเรียกว่า เปิดลูปก็จะมีค่าเป็นอนันต์ และค่าความต้านทานเอาท์พุทนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งทั้งหมดที่ได้กล่าวนี้ก็คือออปแอมป์ในอุดมคติแต่ในทางปฏิบัตินั้นมันไม่ได้เป็นไปตามคุณสมบัติของออปแอมป์ในอุดมคติ เพราะว่าเราสามารถที่จะทำการสร้างหรือออกแบบออปแอมป์ในอุดมคติได้ แต่เราสามารถที่จะสร้างและออกแบบออปแอมป์ที่จะนำมาใช้งานจริงให้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับออปแอมป์ในอุดมคติได้ โดยเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ที่จะนำมาใช้งานจริงกับออปแอมป์ในอุดมคติ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีพารามิเตอร์หลายตัวที่เกี่ยวข้องกับตัวอุปกรณ์ออปแอมป์ที่เราจะต้องนำไปใช้พิจารณาในการออกแบบวงจรในการใช้งานจริง ซึ่งถ้าพิจารณาดูแล้วก็จะเห็นว่าภายในนั้นก็จะมีตัวต้านทานทางด้านอินพุท และตัวต้านทานทางด้านเอาท์พุทต่ออยู่ด้วย ซึ่งก็จะมีค่าอยู่ค่าหนึ่ง โดยที่ออปแอมป์แต่ละเบอร์นั้นก็จะมีค่าดังกล่าวนี้แตกต่างกันไป ดังเช่นที่ได้แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ใช้งานจริงกับออปแอมป์ในอุดมคติ

2.8.1 วงขยายแบบกลับเฟส

วงจรขยายที่ป้อนสัญญาณอินพุ ท เข้าที่ขาอินเวอร์ติ้ง หรือขาลบ ซึ่งจะให้เอาท์พุ ทที่มีลักษณะสัญญาณที่กลับเฟสกับสัญญาณอินพุท180 องศาเป็นวงจรขยายได้ทั้งสัญญาณตรงและสัญญาณแบบสลับอัตราการขยายแบบลูปปิด A_{CL} จากE_iไปสู่ V_0 ขึ้นอยู่กับR_fและR_iดังรูปที่ 2.13

1. ในกรณีV_0ไม่อิ่มตัว (Saturation) ความต่างศักย์ระหว่างขาอินพุทบวกและลบ (E_d) จะเท่ากับศูนย์

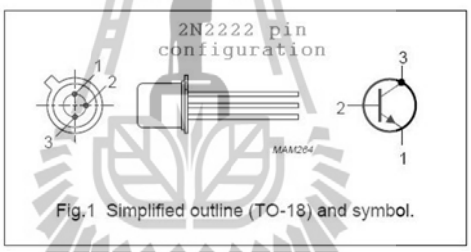
2.ปริมาณกระแสที่ไหลเข้าขาอินพุททั้งสองจะมีค่าน้อยมากจนคิดว่าไม่มีกระแสไหลเข้า



รูปที่ 2.15วงจรขยายแบบกลับเฟส

2.9 หลักการพื้นฐานของทรานซิสเตอร์

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case



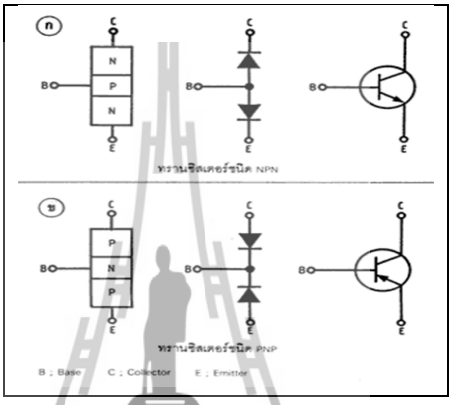
รูปที่ 2.16ทรานซิสเตอร์ใช้ในความถี่สูง

ทรานซิสเตอร์ (transistor) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนได้ ใช้ทำหน้าที่ ขยายสัญญาณไฟฟ้า , เปิด/ปิดสัญญาณไฟฟ้า, ควบคุมแรงดันไฟฟ้าให้คงที่, หรือกล้ำสัญญาณไฟฟ้า (modulate) เป็นต้น การทำงานของทรานซิสเตอร์เปรียบได้กับวาล์วควบคุมที่ทำงานด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่ขาเข้า เพื่อปรับขนาดกระแสไฟฟ้าขาออกที่จ่ายมาจากแหล่งจ่ายไฟ

ทรานซิสเตอร์ประกอบด้วยวัสดุเซมิคอนดักเตอร์ที่มีอย่างน้อยสามขั้วไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อกับวงจร ภายนอก แรงดันหรือกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วทรานซิสเตอร์หนึ่งคู่ จะมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในกระแสที่ไหลผ่านในขั้วทรานซิสเตอร์อีกคู่หนึ่ง เนื่องจากพลังงานที่ถูกควบคุม (เอาต์พุต)จะสูงกว่าพลังงานที่ใช้ในการควบคุม (อินพุท) ทรานซิสเตอร์จึงสามารถขยายสัญญาณได้ ปัจจุบัน บางทรานซิสเตอร์ถูกประกอบขึ้นมาต่างหากแต่ยังมีอีกมากที่พบฝังอยู่ใน แผงวงจรรวม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทรานซิสเตอร์ที่ถูกตั้งชื่ออย่างนี้ก็เพราะว่ามันเปิดให้กระแสไหลผ่านโดยใช้ 2 pole คือ p-type และ n-type. bipolar junction transistor เป็นทรานซิสเตอร์ชนิดแรกที่ถูกผลิตแบบ mass production และผลิตขึ้นโดยการรวม junction ไดโอดสองตัว โดยอาจเป็นชั้นบางๆของสารกึ่งตัวนำชนิด p สองชั้น คั่นกลางด้วย เซมิคอนดักเตอร์ชนิด n (ทรานซิสเตอร์ p-n-p) หรือชั้นบางๆของสารกึ่งตัวนำชนิด n สองชั้น คั่นกลางด้วย เซมิคอนดักเตอร์ชนิด p (ทรานซิสเตอร์ n-p-n) การสร้างแบบนี้ทำให้เกิดสอง p-n junction ได้แก่ junction Base-Emitter และ junction Base-Collector แยกจากกันด้วยพื้นที่บางๆของสารกึ่งตัวนำ ที่รู้จักกันว่าเป็นพื้นที่ Base (junction ไดโอดสองตัวต่อสายถึงกันโดยไม่ใช้พื้นที่แทรกแซงกึ่งตัวนำร่วมกันก็จะไม่ทำให้เป็นทรานซิสเตอร์ได้)ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN และ PNP

BJTs มีสามขาซึ่งตรงกับสามชั้นของสารกึ่งตัวนำ คือ emitter, base และ collector ซึ่งมีประโยชน์ในการขยายสัญญาณ เพราะกระแสระหว่าง base และ emitter สามารถควบคุมกระแสระหว่าง collector และ emiiter ที่ใหญ่กว่าได้. ทรานซิสเตอร์ n-p-n ใน active region junction emitter-base ถูก forward biased (อิเล็กตรอนและ hole มารวมตัวกันใหม่ที่ junction) และอิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าไปใน base region เนื่องจาก base แคบ อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะกระจายออกจนทำให้ junction base-collector กลายเป็น reverse-biased (อิเล็กตรอนและ hole จะถูกรวมตัวกันที่ junction และ ย้ายออกจาก junction นั้น) และอิเล็กตรอนเหล่านั้นจะถูกกวาดเข้าไปใน collector; บางทีหนึ่งในร้อยของอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันใหม่ใน base ซึ่งเป็นกลไกที่โดดเด่นในกระแส base. โดยการควบคุมจำนวนของอิเล็กตรอน ที่สามารถออกจาก base จำนวนอิเล็กตรอนที่เข้าไปที่ collector สามารถถูกควบคุมได้. กระแส collector มีค่าประมาณ β (common-emitter current gain) เท่าของกระแส base. ปรกติมีค่า มากกว่า 100 สำหรับทรานซิสเตอร์สัญญาณขนาดเล็ก แต่จะค่าน้อยกว่าในทรานซิสเตอร์ที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งานพลังงานสูง

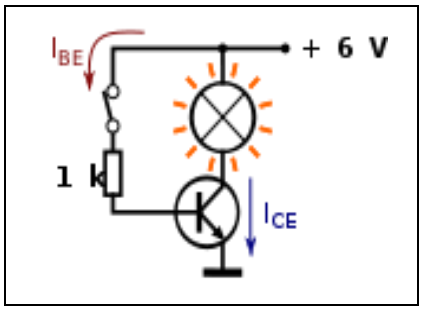
ซึ่งแตกต่างจากทรานซิสเตอร์ field-effect (ดูด้านล่าง), BJTเป็นอุปกรณ์ที่มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ต่ำ. เมื่อแรงดัน base-emitter (V_{be}) เพิ่มขึ้น, กระแส base-emitter ก็เพิ่มขึ้นด้วย และด้วยเหตุนี้ กระแส

collector-emitter (I_{ce} ก็เพิ่มขึ้นแบบ exponential เป็นไปตามแบบไดโอดของ Shockley และรูปแบบของ Ebers-Moll. เพราะความสัมพันธ์แบบ exponential นี้ BJT จึงมี transconductanceสูงกว่า FET Bipolar transistor สามารถถูกทำให้มีกระแสไหลได้โดยการเปิดหน้ากับแสง เพราะการดูดซึมของโฟตอนใน base region ทำให้เกิด photocurrent ที่ทำหน้าที่เป็นกระแส base; กระแส collector จะมีขนาด βเท่าของ photocurrent.อุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อวัตถุประสงค์นี้ มีช่องหน้าต่างที่โปร่งใสในแพคเกจและจะเรียกว่า phototransistors

2.9.1 ทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์

ทรานซิสเตอร์ถูกใช้กันทั่วไปให้ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ , ทั้งสำหรับการใช้งานพลังงานสูง เช่น switched-mode power supplies และ สำหรับการใช้งานพลังงานต่ำ เช่น ลอจิกเกต ในวงจรทรานซิสเตอร์แบบ emitter ลงกราวด์ ตามรูป เป็นวงจรสวิตช์ไฟแสงสว่างที่ในสถานะปกติจะ OFF หลอดไฟก็จะ *ปิด* เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ base สูงขึ้น, กระแส emitter และ collector (I_{ce}) เพิ่มขึ้นแบบ exponential จนอิ่มตัว (อังกฤษ : saturate) แรงดันที่ collector จะลดลงเข้าใกล้ emitter (หรือใกล้ศูนย์) กระแส I_{ce} จะไหลผ่านโหลดเต็มที่ ซึ่งในวงจรนี้คือหลอดไฟ ทำให้หลอดไฟ"เปิด" เราจึงเรียกสถานะของสวิตช์ในขณะนี้ว่า *ON*

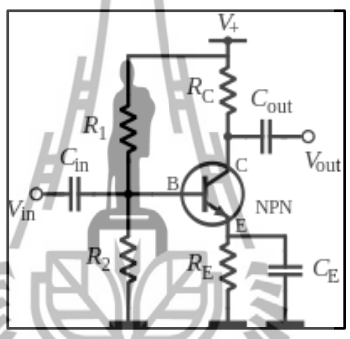
การให้กระแสที่ base (I_{be}) อย่างเพียงพอเป็นปัญหาที่สำคัญในการใช้ทรานซิสเตอร์ให้ทำงานเป็นสวิตช์. ทรานซิสเตอร์ให้ gain เป็นกระแส จึงได้กระแสค่อนข้างมากที่ collector ที่จะถูกสลับ โดยกระแสที่มีขนาดเล็กใน base อัตราส่วนของกระแสเหล่านี้แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิด ของทรานซิสเตอร์และแม้กระทั่งทรานซิสเตอร์ประเภทเดียวกันก็แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกระแสใน collector ในตัวอย่างวงจรสวิทช์ไฟฟ้าแสงสว่างที่แสดง จะมีตัวต้านทานที่ต้องเลือก(สมมติว่าเป็น 1K)ให้มีขนาดที่ให้กระแสที่ base มีเพียงพอ เพื่อให้แน่ใจว่าทรานซิสเตอร์จะทำงานอิ่มตัว ในวงจรสวิตช์ใดๆ ค่าของแรงดันไฟฟ้า อินพุต จะถูกจำกัดให้มีขนาดที่จะทำให้ได้ เอาต์พุต เป็น OFF หรือ ON โดยสมบูรณ์ ทรานซิสเตอร์จึงจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่ดีและการทำงานแบบนี้ เป็นเรื่องธรรมดาใน วงจรดิจิตอลที่ต้องการเพียง "OFF" และ "ON" เท่านั้นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18ทรานซิสเตอร์ใช้เป็นสวิตช์

2.9.2 ทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องขยาย

เครื่องขยายแบบ common-emitter ได้รับการออกแบบเพื่อที่ว่า การเปลี่ยนแปลงเล็กๆ ในแรงดันไฟฟ้า (V_{in}) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กๆในกระแส base ของ ทรานซิสเตอร์ ; การขยายกระแสของทรานซิสเตอร์รวมกับคุณสมบัติของวงจรทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กของ V_{in} ทำให้การเปลี่ยนแปลงขนาดใหญ่ของ V_{out} วงจรขยายด้วยทรานซิสเตอร์ตัวเดียวมีรูปแบบหลายอย่าง มีทั้งแบบขยายกระแส หรือแบบขยาย แรงดันไฟฟ้า หรือทั้งสองแบบตั้งแต่โทรศัพท์มือถือไปยังโทรทัศน์ ผลิตภัณฑ์จำนวนมากรวมทั้งเครื่องขยายเสียง เครื่องส่งวิทยุและเครื่องประมวลสัญญาณ เครื่องขยายสัญญาณเสียงด้วยทรานซิสเตอร์เครื่องแรกให้กำลังไม่กี่ร้อยมิลลิวัตต์ แต่กำลังและความชัดเจนของเสียงค่อยๆเพิ่มขึ้น เมื่อทรานซิสเตอร์ที่ดีกว่าถูกผลิตขึ้น และสถาปัตยกรรมเครื่องขยายได้รับการพัฒนาขึ้นดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19ทรานซิสเตอร์เป็นเครื่องขยาย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่3
การออกแบบโครงงาน

3.1บทนำ

สัญญาณเสียงอินพุทส่งเข้าสู่วงจรกรองความถี่แต่ละย่านมี3ย่านความถี่คือ 1.Sallen-Key Low Pass Filter เพื่อกรองสัญญาณไม่เกิน 400Hz 2.Sallen-key Band Pass Filterเพื่อกรองสัญญาณความถี่ 400Hzถึง1.3 kHz3.Sallen-key High Pass Filterเพื่อกรองความถี่ตั้งแต่ 1.3kHz ขึ้นไปแล้วส่งสัญญาณไปวงจร Compressor ในแต่ละย่านความถี่และมีสัญญาณเอาต์พุทของวงจร Compressor ส่วนหนึ่งส่งไปที่ วงจรLevel Detectorเพื่อทำการวัดระดับแรงดันของสัญญาณแล้วส่งไปไบแอสขาเบสของทรานซิสเตอร์แต่ละย่านความถี่เพื่อบีบอัดสัญญาณเสียงในแต่ละย่านความถี่ที่ตั้งไว้จากนั้นก็จะนำทั้ง 3 สัญญาณที่ได้มารวมเข้ากันด้วย วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)เพื่อให้ได้สัญญาณเสียงเดิมแล้วส่งไปยังวงจร Sallen-Key Low Pass Filter เพื่อกรองสัญญาณไม่เกิน 30kHz แล้วทำการส่งออกไปยังเอาต์พุทต่อไป

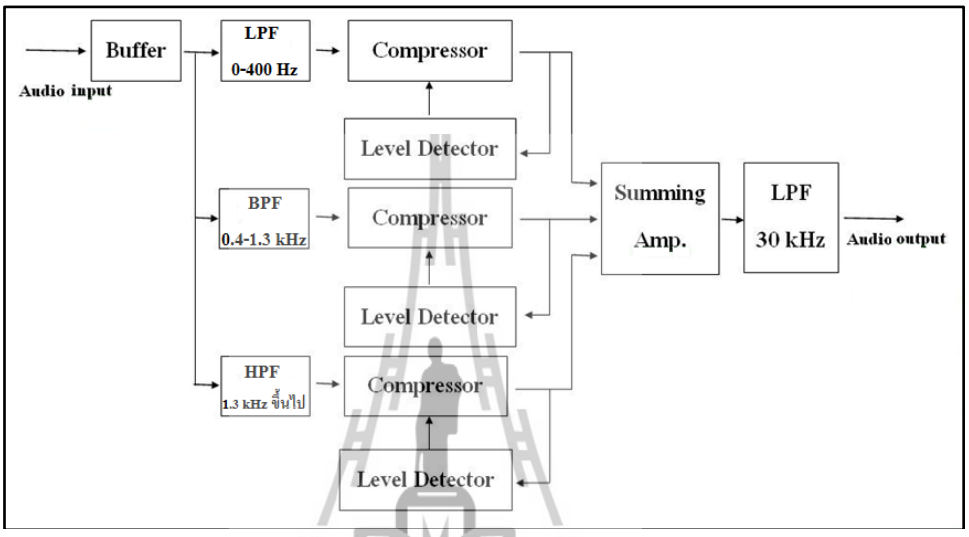
ดังนั้นในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ MultibandCompressor ซึ่งแบ่งออกเป็น 7 ส่วนได้แก่1.Sallen-Key Low Pass Filter 2Sallen-keyBand Pass Filter, 3Sallen-key High Pass-Filter4.Level Detector 5.Compressor6. วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing-Amplifier)และ7. วงจรSallen-Key Low Pass Filterตลอดจนได้มีการออกแบบวงจร กรองความถี่ในย่านต่าง ๆและ การออกแบบวงจร Compressor โดยใช้โปรแกรม Protel 99 seเพื่อออกแบบ Print Circuit Board (PCB)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2องค์ประกอบและหลักการทำงานของMultiband Compressor

หลักการทำงานของ Multiband Compressor จะเริ่มจากสัญญาณเสียงที่ส่งเข้าสู่วงจรกรองความถี่แต่ล่ะย่านมี3ย่านความถี่ 1.Sallen-Key Low Pass Filterเพื่อกรองความถี่ให้ไม่เกิน 400 Hz 2. Sallen-key Band Pass Filterเพื่อกรองสัญญาณความถี่ 400Hz ถึง1.3kHz 3.Sallen-key High Pass Filter เพื่อกรองความถี่ตั้งแต่ 1.3kHzขึ้นไปแล้ววงจรแต่ละย่านความถี่จะทำงานเหมือนกันคือสัญญาณดังกล่าวจะเข้าสู่วงจร Compressorเพื่อทำการบีบอัดสัญญาณเสียงแล้วส่งออกเอาต์พุท ก่อนทำการCompressorต้องตรวจสอบสัญญาณเสียงด้วย วงจร Level Detectorโดยที่วงจรLevel Detector จะเปลี่ยนจากสัญญาณ AC ให้เป็นสัญญาณ DC ตามความแรงของสัญญาณเอาต์พุทของวงจร Compressor จากนั้นสัญญาณDCดังกล่าวก็จะเข้าวงจรCompressorโดยสัญญาณ DCจะเข้าไปไบแอสขาเบสของทรานซิสเตอร์เพื่อกำหนดวงจรว่าจะบีบอัดสัญญาณเสียงขณะใดโดยถ้ามีสัญญาณ

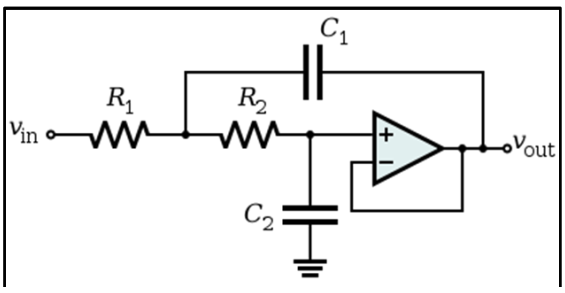
เอาต์พุตที่ออกจากวงจร Compressor ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด จะยังไม่ทำการบีบอัดสัญญาณเสียงแต่ถ้ามีสัญญาณเสียงสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดจะเริ่มทำการบีบอัดสัญญาณเสียงจากนั้นสัญญาณก็เข้าไปที่วงจรSumming Amplifierเพื่อรวมสัญญาณทั้งหมดแล้วส่งไปยังวงจร Sallen-Key Low Pass Filter เพื่อกรองความถี่ไม่ให้เกิน30 kHzซึ่งจะแสดงดังบล็อกไดอะแกรม
ดังรูปที่3.1



รูปที่ 3.1บล็อกไดอะแกรมMultibandCompressor

3.3วงจรSallen-Key Low Pass Filter

โดยทั่วไปลักษณะของสัญญาณสียงจะมีการแบ่งย่านความถี่ออกเป็น 3 ย่านคือ 1.ย่านความถี่ต่ำ 2.ย่านความถี่กลาง 3.ย่านความถี่สูง โดยย่านความถี่ต่ำเราจะทำการกรองสัญญาณด้วยวงจร Sallen-Key Low Pass Filter ที่มีความถี่ไม่เกิน 400 Hzเช่นสัญญาณเสียงทุ้มสัญญาณเหล่านี้จะมีความถี่ไม่เกิน 400 Hz ออกแบบวงจรดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2วงจรSallen-Key Low Pass Filter

จากรูปที่ 3.2ในวงจรนี้เราจะออกแบบ Sallen-keyLow Pass Filterที่มี Cutoff Frequency 400 Hz โดยการคำนวณค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุตามสมการที่ 2.1 ได้ดังนี้

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C1C2}} \quad \text{.....(2.1)}$$

R_1 = 220 kΩ

R_2 = 220 kΩ

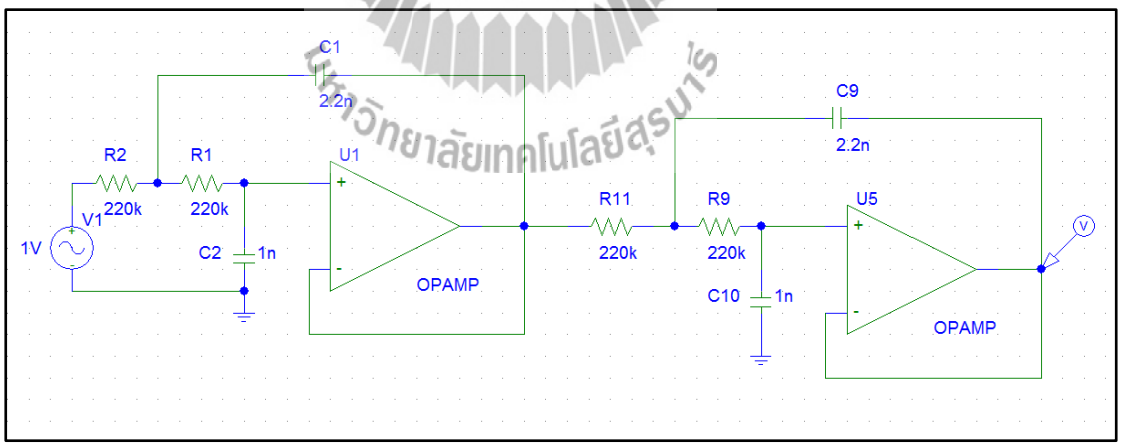
C_1 = 2.2nF

C_2 = 1 nF

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{(220k\Omega)(220k\Omega)(2.2nF)(1nF)}}$$

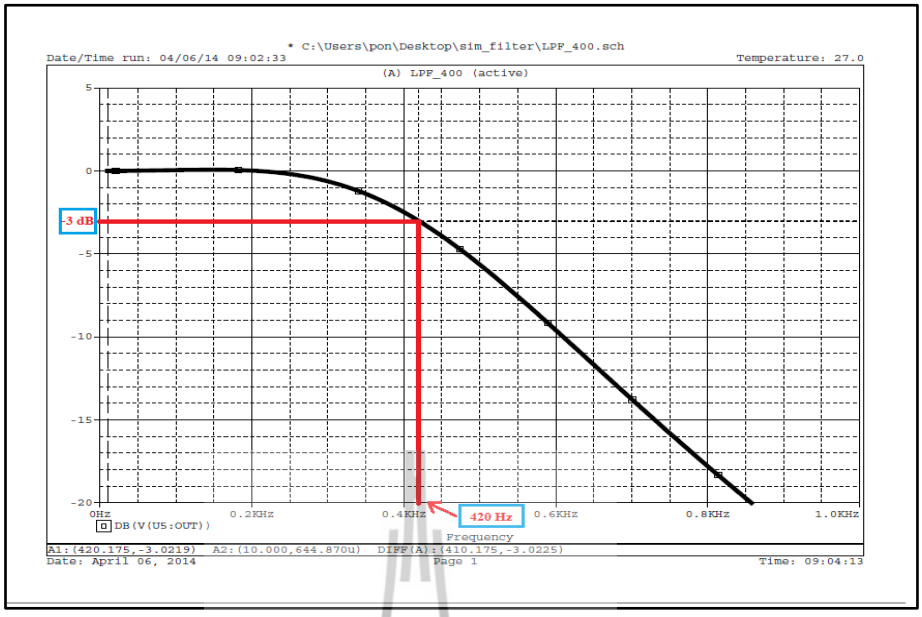
$$fc = 487.73Hz$$

จากผลการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ จะทำให้ค่า Cutoff Frequency= 487.73Hz ซึ่งเป็นCutoff Frequency ที่ใช้งานไม่ได้โดยการใช้งานจริงเราจะออกแบบวงจร Sallen-Key Low Pass Filter2ตัวซึ่งจะทำงานรวมกัน โดยสามารถออกแบบวงจรได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรSallen-Key Low Pass Filter 2ตัว

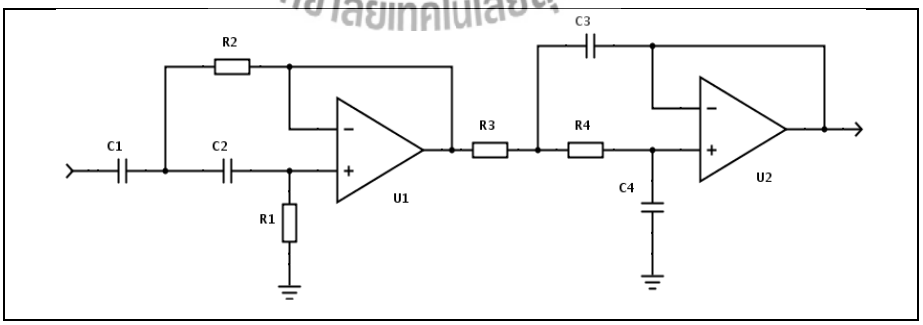
จากผลการออกแบบ วงจรSallen-Key Low Pass Filter2 ตัว สามารถจำลองผลกาตอบสนองของความถี่Cutoff Frequency-3dB อยู่ที่ความถี่ 420 Hzซึ่งได้ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4ค่า Cutoff Frequencyวงจร Sallen-Key Low Pass Filter

3.4วงจรSallen-key Band Pass Filter

โดยทั่วไปลักษณะของสัญญาณเสียงจะมีการแบ่งย่านความถี่ออกเป็น 3 ย่านคือ 1.ย่านความถี่ต่ำ 2.ย่านความถี่กลาง 3.ย่านความถี่สูง โดยย่านความถี่กลางจะทำการกรองสัญญาณด้วยวงจรSallen-Key Band Pass Filter ที่มีความถี่ตั้งแต่400 Hz ถึง 1.3 kHz เช่นสัญญาณเสียงมนุษย์ สัญญาณเหล่านี้จะมีความถี่ตั้งแต่ 400 Hz ถึง 1.3 kHz เป็นต้น ออกแบบวงจรดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5วงจรSallen-key Band Pass Filter

จากรูปที่ 3.5ในวงจรนี้เราจะออกแบบ Sallen-keyที่มี Cutoff Frequency 400Hz

โดยการคำนวณค่าความต้านทาน และค่าตัวเก็บประจุสมการที่ 3.1 ได้ดังนี้

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{R3R4C3C4}} \quad \text{.....(2.1)}$$

$R_3 = 220\ k\Omega$

$R_4 = 220\ k\Omega$

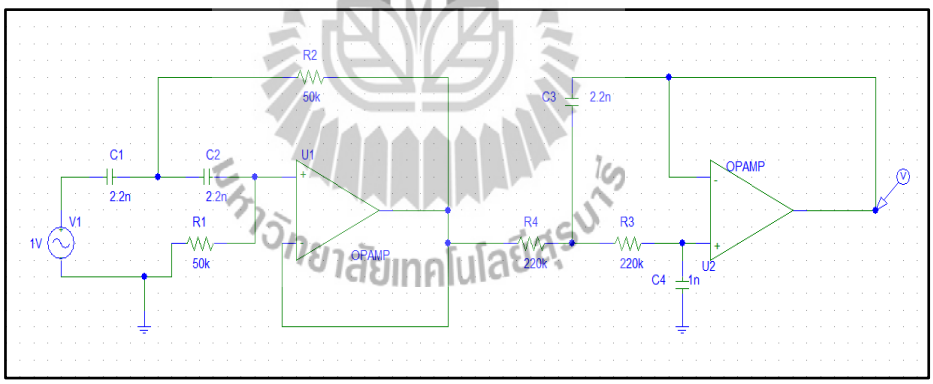
$C_3 = 2.2nF$

$C_4 = 1\ nF$

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{(220k\Omega)(220k\Omega)(2.2nF)(1nF)}}$$

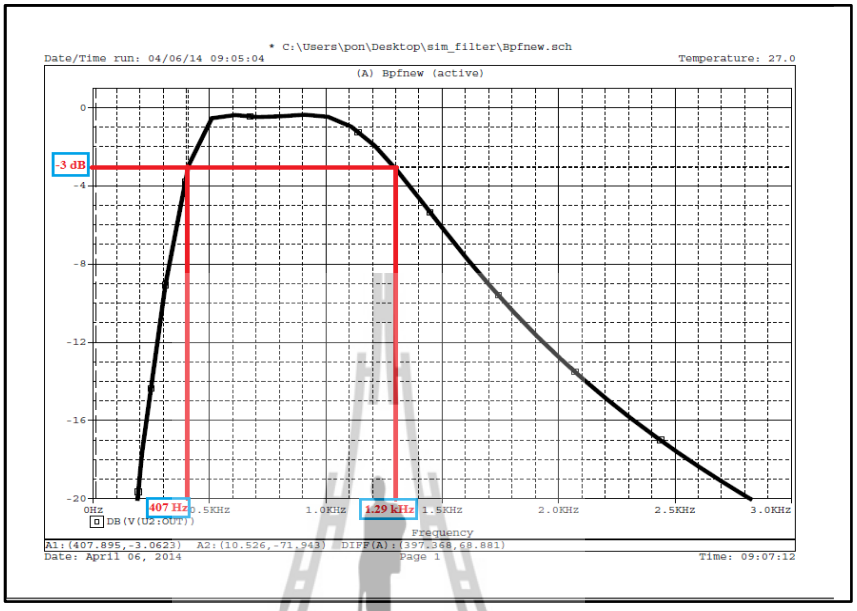
$fc = 487.73\ Hz$

จากผลการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ จะทำให้ค่าCutoff Frequency = 487.73 Hz ซึ่งเป็น Cutoff Frequencyที่ใช้งานได้โดยการใช้งานจริงจะออกแบบวงจรSallen-KeyBand Pass Filter ออกแบบวงจรได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรSallen-KeyBand Pass Filter

จากผลการออกแบบ วงจรSallen-key Band Pass Filterสามารถจำลองผลการตอบสนองของความถี่Cutoff Frequency-3dBอยู่ที่ความถี่407Hzซึ่งได้ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7ค่า Cutoff Frequencyวงจร Sallen-key Band Pass Filter

จากรูปที่ 3.4ในวงจรนี้เราจะออกแบบ Sallen-key Band Pass Filterที่มี Cutoff Frequency 400-1,300Hz โดยการคำนวณค่าความต้านทาน และค่าตัวเก็บประจุที่ความถี่ 1,300 Hz ตามสมการที่ 3.1 ได้ดังนี้

$$fc=\frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C1C2}} \quad \text{.....(2.1)}$$

$R_1 = 50\ k\Omega$

$R_2 = 50\ k\Omega$

$C_1 = 2.2\ nF$

$C_2 = 2.2nF$

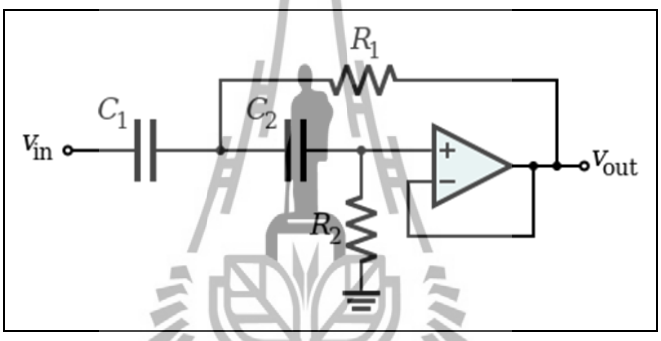
$$fc=\frac{1}{2\pi\sqrt{(50k\Omega)(50k\Omega)(2.2nF)(2.2nF)}}$$

$fc=1.45\ KHz$

จากผลการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ จะทำให้ค่าCutoff Frequency = 1.45KHz ซึ่งเป็น Cutoff Frequencyที่ใช้งานได้จากผลการออกแบบวงจร Sallen-Key Band Pass Filterสามารถจำลองผลการตอบสนองของความถี่ Cutoff Frequency-3dB อยู่ที่ความถี่1.29KHz ซึ่งได้ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการดังรูปที่ 3.7

3.5Sallen-key High Pass Filter

โดยทั่วไปลักษณะของสัญญาณสียงจะมีการแบ่งย่านความถี่ออกเป็น 3 ย่านคือ 1.ย่านความถี่ต่ำ 2.ย่านความถี่กลาง 3.ย่านความถี่สูง โดยย่านความถี่สูงเราจะทำการกรองสัญญาณด้วยวงจรSallen-Key Low Pass Filter ที่มีความถี่1.3kHzขึ้นไปเช่นสัญญาณเสียงแหลมสัญญาณเหล่านี้จะมีความถี่1.3kHzขึ้นไปออกแบบวงจรดังรูปที่3.8



รูปที่ 3.8วงจร Sallen-key High Pass Filter

จากรูปที่3.8ในวงจรนี้เราจะออกแบบSallen-Key High Pass Filter ที่มี Cutoff Frequency 1.3kHz โดยการคำนวณค่าความต้านทานและค่าตัวเก็บประจุ ตามสมการที่ 3.1 ได้ดังนี้

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C1C2}} \quad \text{.....(2.1)}$$

$R_1 = 100\ k\Omega$

$R_2 = 50\ k\Omega$

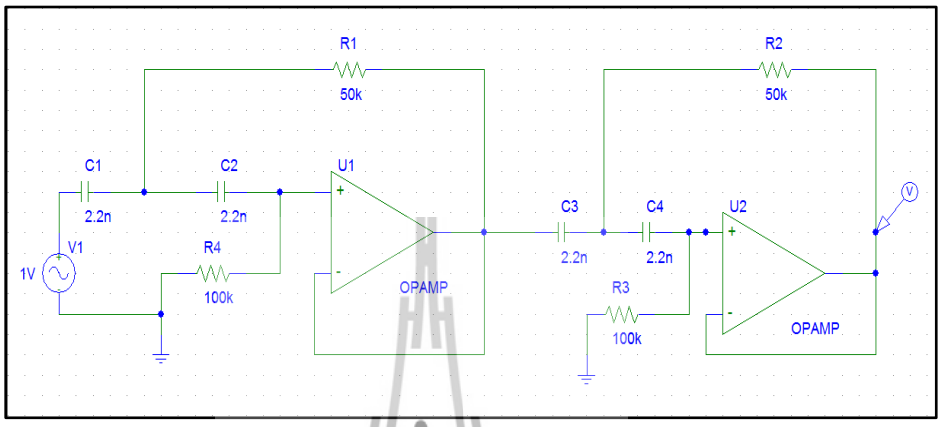
$C_1 = 2.2nF$

$C_2 = 2.2nF$

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{(100k\Omega)(50k\Omega)(2.2nF)(2.2nF)}}$$

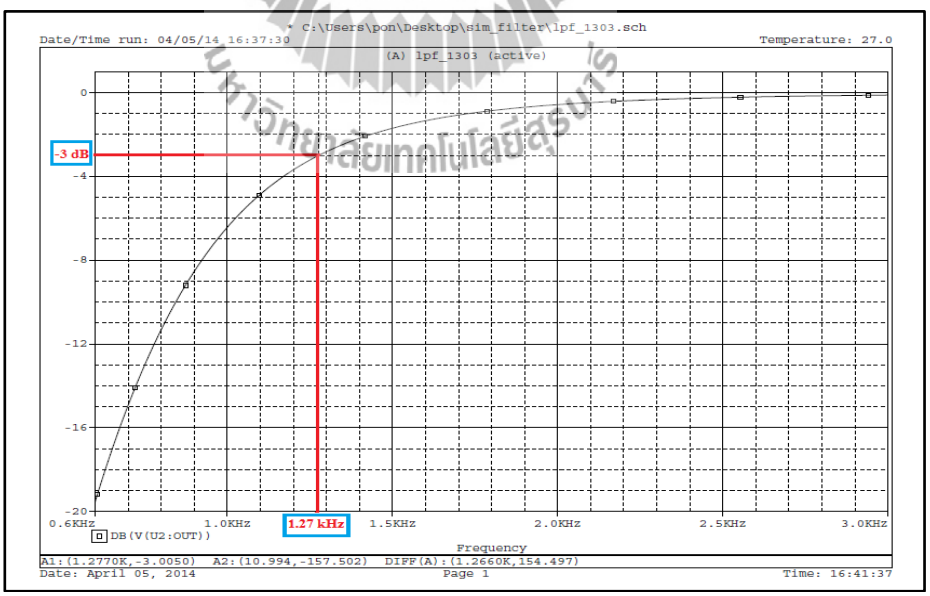
$fc = 1.02\ kHz$

จากผลการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ จะทำให้ค่าCutoff Frequency = 1.023kHz ซึ่งเป็น Cutoff Frequencyที่ใช้งานไม่ได้โดยการใช้งานจริงเราจะออกแบบวงจรSallen-Key High Pass Filter2 ตัวซึ่งจะทำงานรวมกันโดยสามรถออกแบบวงจรได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรSallen-KeyHigh Pass Filter 2ตัว

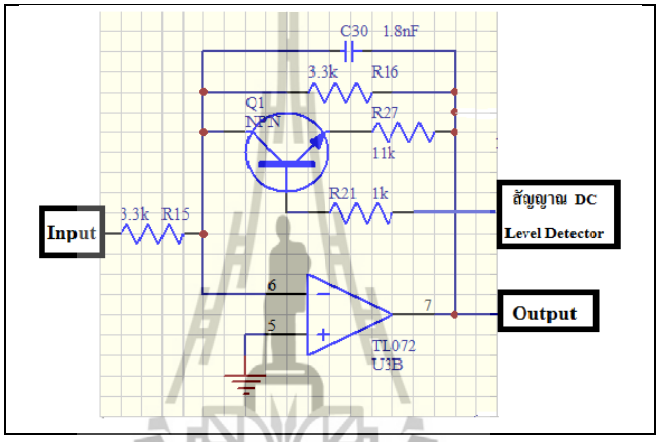
จากผลการออกแบบ วงจร Sallen-Key High Pass Filter2 ตัว สามารถจำลองผลการตอบสนองของความถี่Cutoff Frequency-3dB อยู่ที่ความถี่1.27kHz ซึ่งได้ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10ค่า Cutoff Frequencyวงจร Sallen-Key High Pass Filter

3.6วงจรCompressor

หลักการที่ใช้ในการทำบีบอัดสัญญาณเสียงจะใช้หลักการลดอัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณซึ่งมีสามารถในการบีบอัดสัญญาณเสียงได้ประมาณ 1.3เท่าโดยส่วนของ Compressor จะแยกรับอินพุทจากสัญญาณเสียงที่ผ่านวงจรกรองความถี่ในแต่ละย่าน คือ 1.Sallen-keyLow Pass Filter2.Sallen-key Band Pass Filter.3Sallen-key High Pass Filter. แล้วจะทำการเลือกบีบอัดสัญญาณเสียงตามแรงดัน DC ของวงจรLevel Detectorที่เข้ามาไบแอสขาเบสของทรานซิสเตอร์ในแต่ละย่านความถี่แบบอิสระต่อกันดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11วงจร Compressor

$$Gain=-\left(\frac{Rf}{Ri}\right) \quad \text{.....(2.2)}$$

อัตราการบีบอัดสัญญาณสูงสุด

$$Gain=-\left(\frac{R16}{R15}\right)$$

$R_{15} = 3.3\ k\Omega$

$R_{16} = 3.3\ k\Omega$

$R_{27} = 11\ k\Omega$

$$Gain=-\left(\frac{3.3\ k\Omega}{3.3\ k\Omega}\right)$$

$Gain=-1$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อัตราการบีบอัดสัญญาณต่ำสุด

$$Gain=-\left(\frac{R16//R27}{R15}\right)$$

R_{15}= 3.3 kΩ

R_{16} = 3.3 kΩ

R_{27} = 11 kΩ

$$Gain=-\left(\frac{3.3\ k\Omega//11\ k\Omega}{3.3\ k\Omega}\right)$$

Gain=-0.769

อัตราการบีบอัดสัญญาณทั้งหมด

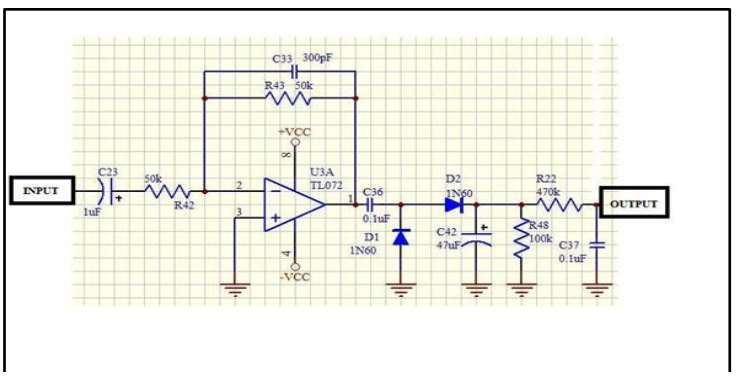
$$\text{อัตราการบีบอัดสัญญาณทั้งหมด}=\frac{Gain(Max)}{Gain(Min)}$$

$$\text{อัตราการบีบอัดสัญญาณทั้งหมด}=\frac{-1}{-0.769}$$

อัตราการบีบอัดสัญญาณทั้งหมด=1.3 เท่า

3.7วงจรLevel Detector

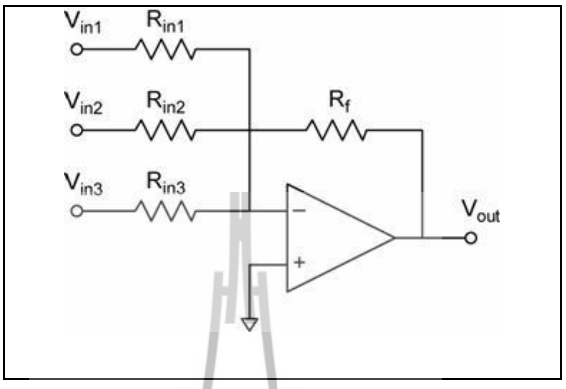
เป็นวงจรคล้ายกับวงจร Half Wave โดยสัญญาณเสียงจะผ่านไดโอด ซึ่งจะทำหน้าที่ยอมให้สัญญาณที่อยู่ในฝั่งด้านบวกผ่านไปได้แล้วจะทำการกรองด้วยตัวเก็บประจุเพื่อทำให้เกิดแรงดัน DC คงที่และส่งเข้าไปในวงจรCompressorดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12วงจรLevel Detector

3.8วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

เอาต์พุตที่ได้จากวงจร Compressor แต่ละย่านความถี่จะเป็นสัญญาณคนละสัญญาณกันซึ่งจะผ่านการ Compressor ในแต่ละย่านความถี่ที่ทำงานอิสระแยกจากกันดังนั้น จึงต้องทำการรวมสัญญาณเสียงในแต่ล่ะย่านเข้าด้วยกัน ดังรูปที่3.13



รูปที่ 3.13วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ

$$Vo=-\left(\frac{Rf}{R1}V1+\frac{Rf}{R2}V2+\frac{Rf}{R3}V3\right)\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.3)$$

$R_f = 150\Omega$

$R_1 = 150\Omega$

$R_2 = 150\Omega$

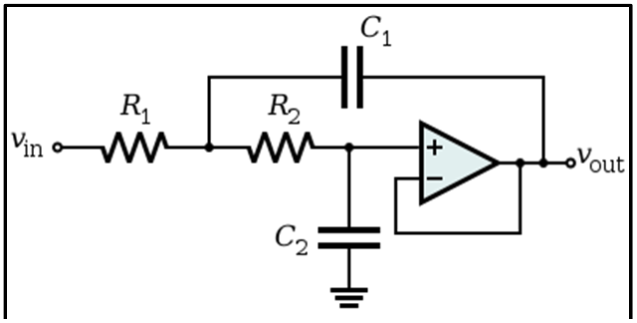
$R_3 = 150\Omega$

$$Vo=-\left(\frac{150}{150}V1+\frac{150}{150}V2+\frac{150}{150}V3\right)$$

$$Vo = -(V1+V2+V3)$$

3.9วงจรSallen-key Low Pass Filter

โดยทั่วไปลักษณะสัญญาณเสียง Audio มีความถี่ไม่เกิน30 kHz ซึ่งเป็นสัญญาณเสียงที่เป็น CDPlayer หรือ Multimediaต่างๆ จะมีความถี่ของสัญญาณเสียงเกิน30 kHzดังนั้นจึงต้องมีวงจร Sallen-keyLow Pass Filterเพื่อกรองสัญญาณดังกล่าวก่อนที่จะทำการModulate ดังรูปที่3.14



รูปที่ 3.14วงจร Sallen-key Low Pass Filter

จากรูปที่3.14ในวงจรนี้เราจะออกแบบ Sallen-key ที่มี Cutoff Frequency 30kHz โดยการคำนวณค่าความต้านทาน และ ค่าตัวเก็บประจุ ตามสมการที่ 3.1 ได้ดังนี้

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C1C2}} \qquad \text{.....(2.1)}$$

$R_1 = 3\ k\Omega$

$R_2 = 3\ k\Omega$

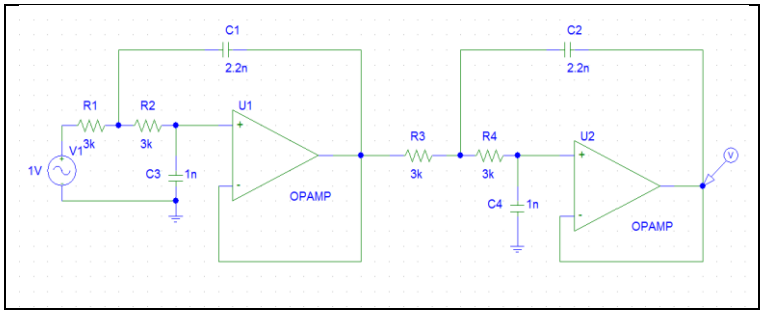
$C_1 = 2.2\ nF$

$C_2 = 1\ nF$

$$fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{(3k\Omega)(3k\Omega)(2.2nF)(1nF)}}$$

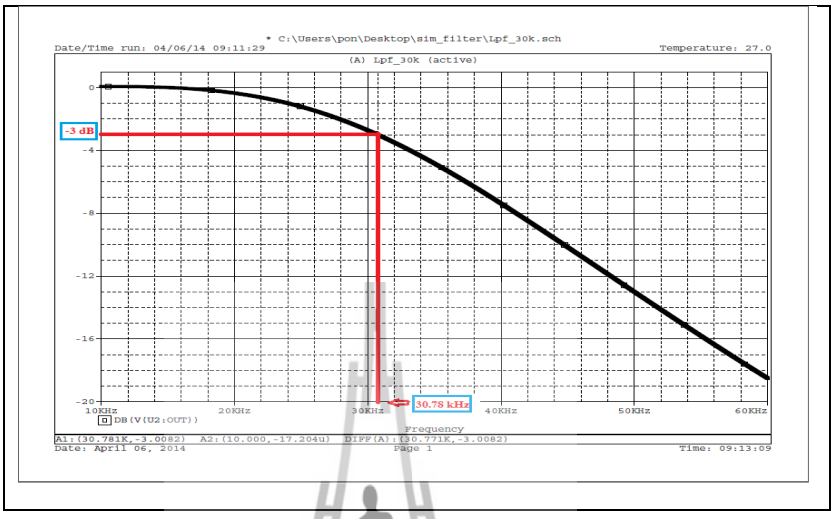
$fc = 35.76\ kHz$

จากผลการคำนวณจากสมการที่ 3.1 จะเห็นว่าค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ จะทำให้ค่า Cutoff Frequency = 35.76kHz ซึ่งเป็น Cutoff Frequency ที่ใช้งานไม่ได้โดยการใช้งานจริงเราจะออกแบบวงจรSallen-Key Low Pass Filter2ตัวซึ่งจะทำงานรวมกันโดยสามารถออกแบบวงจรได้ดังรูปที่ 3.15



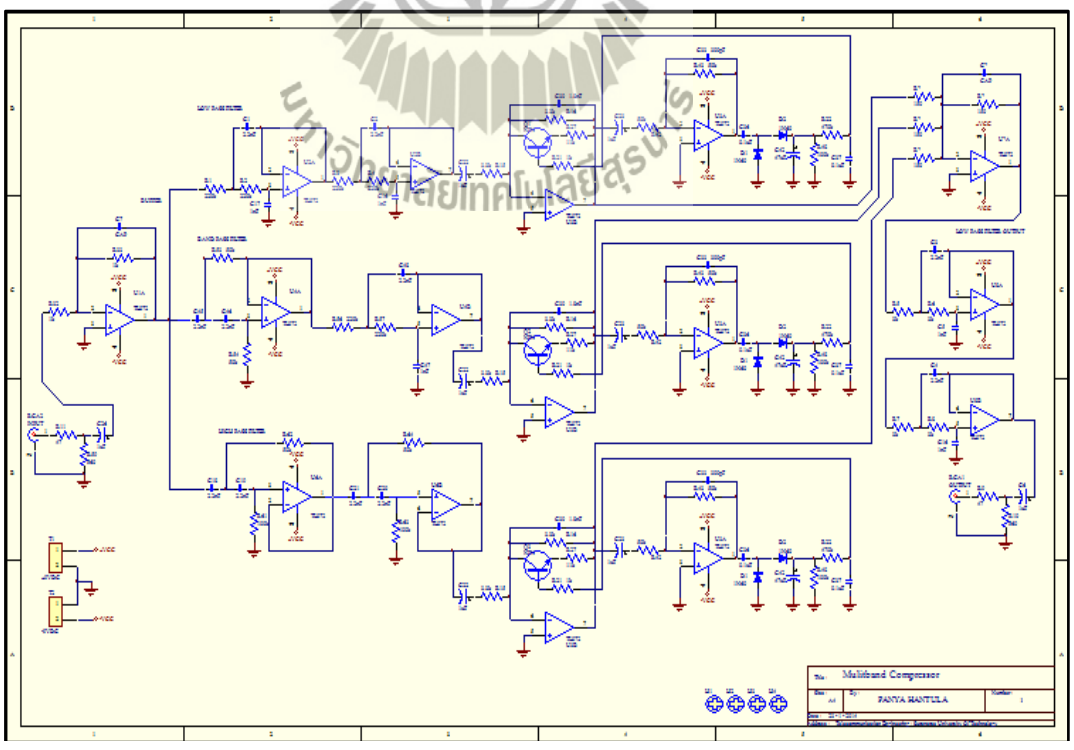
รูปที่ 3.15วงจร Sallen-Key Low Pass Filter 2ตัว

จากผลการออกแบบ วงจรSallen-Key Low Pass Filter2 ตัว สามารถจำลองผลการตอบสนองของความถี่Cutoff Frequency-3dB อยู่ที่ความถี่ 30.78kHz ซึ่งได้ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.16



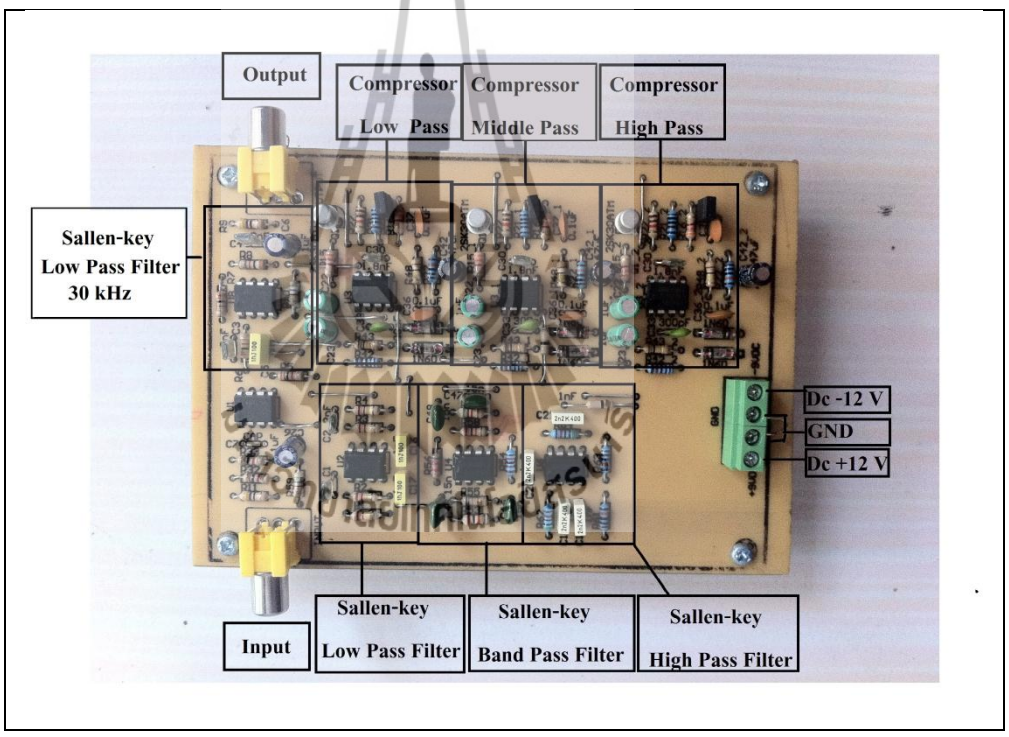
รูปที่ 3.16 วงจร Sallen-key Low Pass Filter

3.10แบบวงจรรวมMultiband Compressor



รูปที่ 3.17Multiband Compressor

จากรูปที่ 3.17แสดงรูปวงจรรวมหลักการทำงานของ Multiband Compressorจะเริ่มจากสัญญาณเสียงที่ส่งเข้าสู่วงจรกรองความถี่แต่ละย่านมี 3 ย่านความถี่คือ 1.Sallen-Key Low Pass Filterเพื่อกรองสัญญาณไม่เกิน400 Hz 2.Sallen-keyBand Pass Filterเพื่อกรองสัญญาณความถี่ 400-1.3kHz3. Sallen-key High Pass Filter เพื่อกรองความถี่ตั้งแต่ 1.3 kHzขึ้นไปแล้วมีสัญญาณเอาต์พุตของวงจร Compressorส่วนหนึ่งส่งไปวงจร Level Detectorจะเปลี่ยนจากสัญญาณ AC ให้เป็นสัญญาณ DCตามความแรงของสัญญาณเอาต์พุตแล้วส่งไปไบแอสขาเบสของทรานซิสเตอร์แต่ละย่านความถี่เพื่อบีบอัดสัญญาณเสียงในแต่ละย่านความถี่แล้วจะนำสัญญาณเสียงที่ออกมาในแต่ละย่านความถี่มารวมกันโดยใช้ วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)แล้วนำสัญญาณที่ได้เข้าวงจรSallen-keyLow Pass Filterอีกทีเพื่อทำการกรองความถี่ไม่ให้เกิน 30 kHz แล้วส่งสัญญาณเสียงที่ได้ออกทางเอาต์พุตต่อไป



รูปที่ 3.18อุปกรณ์Multiband Compressor

บทที่ 4
ผลการทดสอบ

4.1บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบวงจร Multiband Compressorในส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอาทิเช่น การทดสอบวงจร Sallen-Key Low Pass Filterที่มีความถี่ Cutoff Frequency 400Hzสำหรับกรองสัญญาณเสียงต่ำวงจรSallen-Key Band Pass Filter ที่มีความถี่ Cutoff Frequency 400 Hzถึง1.3 kHz สำหรับกรองสัญญาณเสียง กลาง วงจรSallen-KeyHigh Pass Filter ที่มีความถี่ Cutoff-Frequency 1.3kHz สำหรับกรองสัญญาณเสียง สูงเป็นต้น การทดสอบสัญญาณที่ออกจาก อุปกรณ์บีบอัดสัญญาณเสียงแบบหลายย่านความถี่(Multiband Compressor)มีดังต่อไปนี้

4.2ผลการทดสอบวงจรSallen-KeyLow Pass Filter

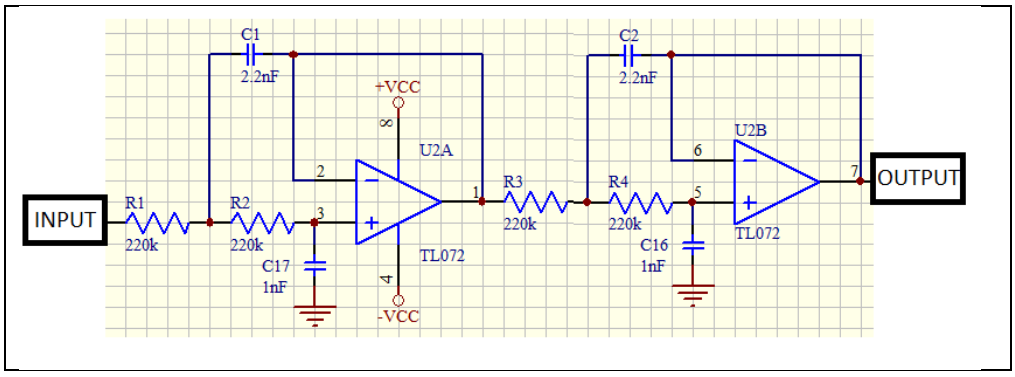
จากการออกแบบวงจร Sallen-KeyLowPassFilter ในบทที่ 3ทำให้ได้วงจร Sallen-KeyLow PassFilter 400 Hz และที่ใช้สำหรับกรองความถี่ต่ำ ในวงจร Multiband Compressorซึ่งขั้นตอนการหา Sallen-Key Low Pass Filterมีวิธีการดังนี้

4.2.1วิธีการหาความถี่ของวงจรSallen-KeyLow Pass Filter 400 Hz

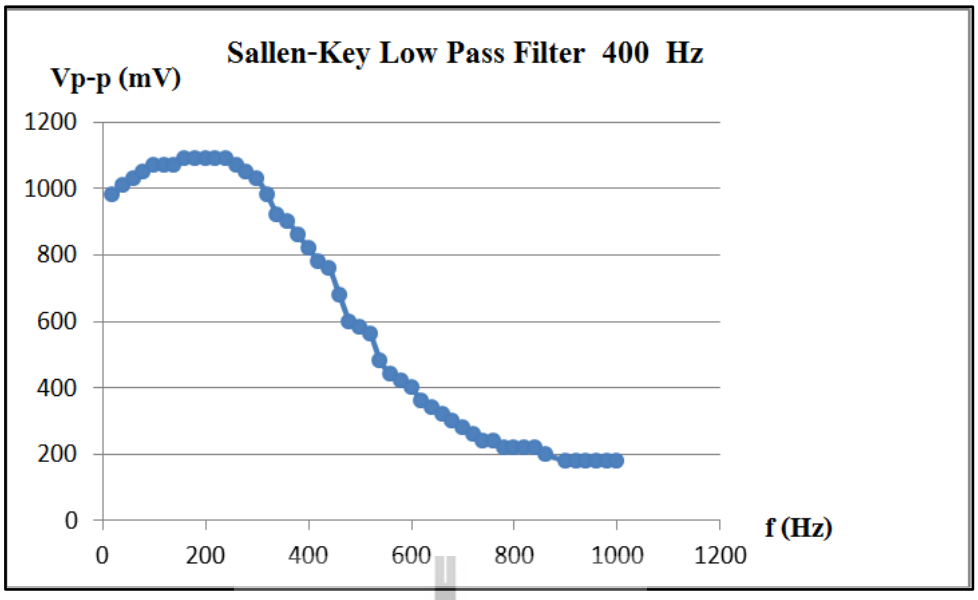
1.สร้างสัญญาณ Sine ตั้งแต่ 20Hz –1 kHz เข้าที่ Input แรงดัน 1Vp-pของวงจร Sallen-KeyLow Pass Filter400 Hz

2.ใช้ OscilloscopeวัดสัญญาณOutputในหน่วยของ Vp-pที่วงจร Low Pass Filter 400 Hz

3.บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์



รูปที่ 4.1วงจรSallen-Key Low Pass Filter 400 Hz



รูปที่ 4.2แสดงกราฟSallen-Key Low Pass Filter 400Hz

จากผลการทดสอบ Sallen-Key Low Pass Filter 400 Hz จะสามารถคำนวณหาค่า Cutoff Frequency ได้ดังนี้

4.2.2 วิธีการคำนวณหาCutoff Frequency ของ Sallen-Key Low Pass Filter 400 Hz

จากผลการทดสอบ Sallen-KeyLow Pass Filter 400Hz สามารถคำนวณ หาCutoff-Frequency ได้จากสมการที่(4.1)

dB = 20logVmax – 3dB..... (4.1)

dB = 20log 1.09 – 3 dB

dB = 3.694 - 3 dB

dB =-2.25 dB

เปลี่ยนdBเป็นV p–p

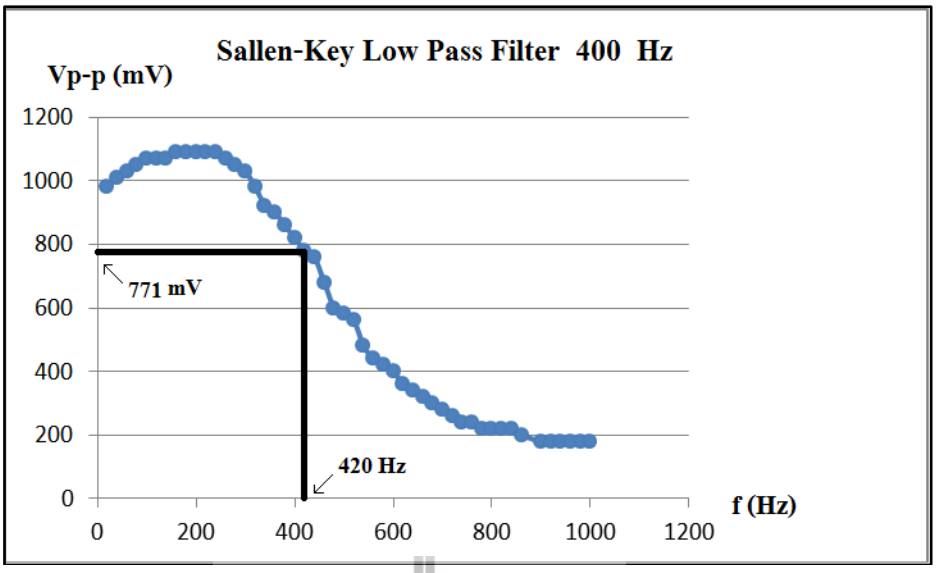
dB = 20log Vp-p

-2.25 = 20log Vp-p

ดังนั้นV p–p= 771mV

จากผลการทดสอบ Sallen-Key Low Pass Filter 400 Hz จะสามารถคำนวณหาค่า Cutoff-Frequency ได้ดังรูปที่ 4.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.3 Cutoff Frequencyของวงจร Sallen-Key Low Pass Filter 400 Hz

4.3ผลการทดสอบวงจร Sallen-Key Band Pass Filter

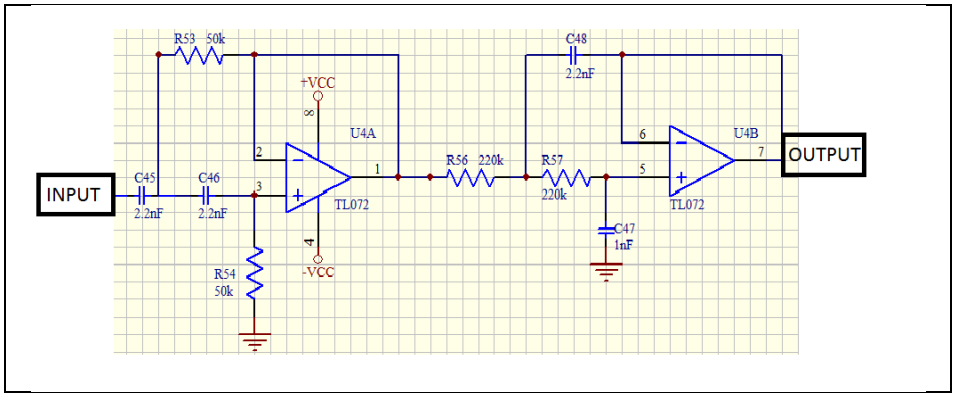
จากการออกแบบวงจร Sallen-Key Band Pass Filter ในบทที่ 3ทำให้ได้วงจร Sallen-Key Band Pass Filter 400 Hz และที่ใช้สำหรับกรองความถี่ต่ำ ในวงจร Multiband Compressor ซึ่งขั้นตอนการหา Sallen-Key Band Pass Filter มีวิธีการดังนี้

4.3.1 วิธีการหาความถี่ของวงจร Sallen-Key Band Pass Filter 400 Hzถึง 1.3 kHz

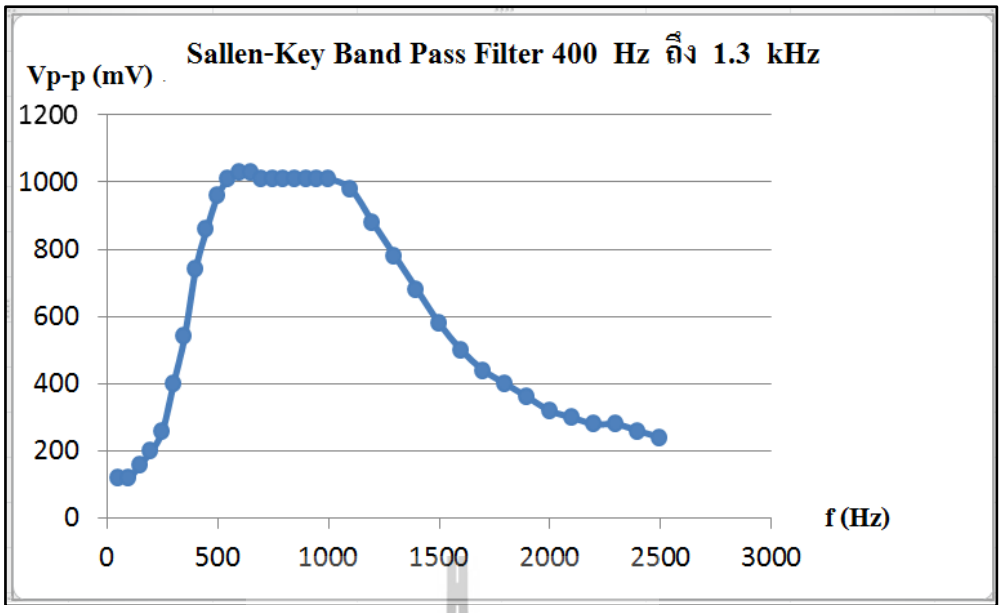
1.สร้างสัญญาณ Sine ตั้งแต่ 50Hz – 2.5 kHz เข้าที่ Input แรงดัน 1 Vp-pของวงจร Sallen-Key Band Pass Filter400 Hz ถึง 1.3 kHz

2. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณOutput ในหน่วยของ Vp-p ที่วงจร Band Pass Filter 400 Hzถึง 1.3 kHz

3. บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์



รูปที่ 4.4วงจรSallen-Key Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHz



รูปที่ 4.5แสดงผลการทดสอบ Band Pass Filter 400 Hzถึง 1.3 kHz

จากผลการทดสอบ Sallen-Key Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHzจะสามารถคำนวณหาค่า Cutoff Frequency ได้ดังนี้

4.3.2 วิธีการคำนวณหา Cutoff Frequency ของ Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHz

จากผลการทดสอบ Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHzสามารถคำนวณ หาCutoff Frequency ได้จากสมการที่ (4.1)

dB = 20logVmax – 3dB..... (4.1)

dB = 20log 1.03 – 3 dB

dB = 0.257 – 3 dB

dB = -2.743 dB

เปลี่ยน dB เป็น V p–p

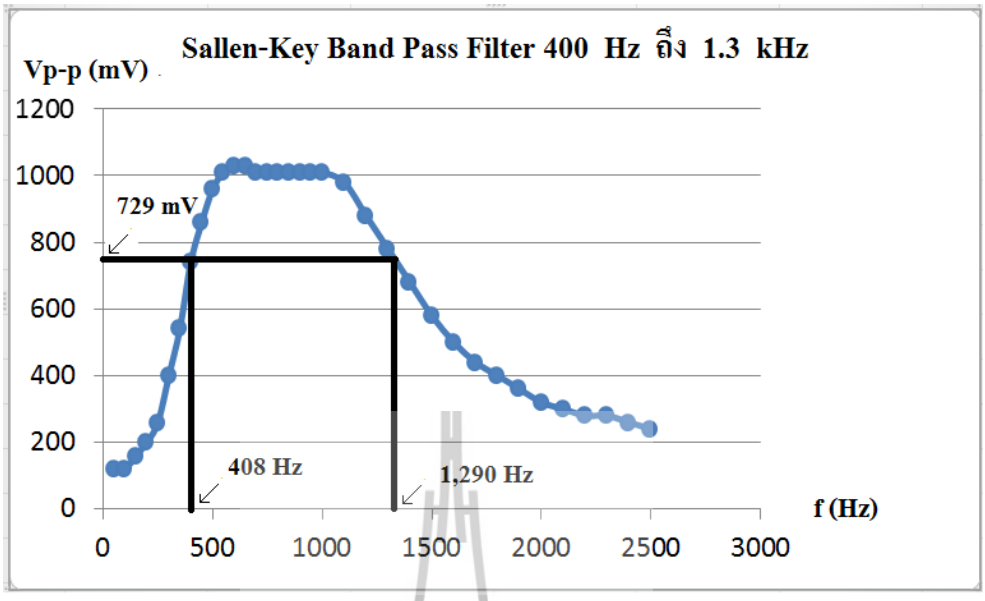
dB = 20log Vp-p

-2.743 = 20log Vp-p

ดังนั้น V p–p = 729mV

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากผลการทดสอบ Sallen-Key Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3kHz จะสามารถคำนวณหาค่า Cutoff Frequency ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 Cutoff Frequencyของวงจร Sallen-Key Band Pass Filter 400 Hz ถึง 1.3 kHz

4.4ผลการทดสอบวงจร Sallen-Key High Pass Filter

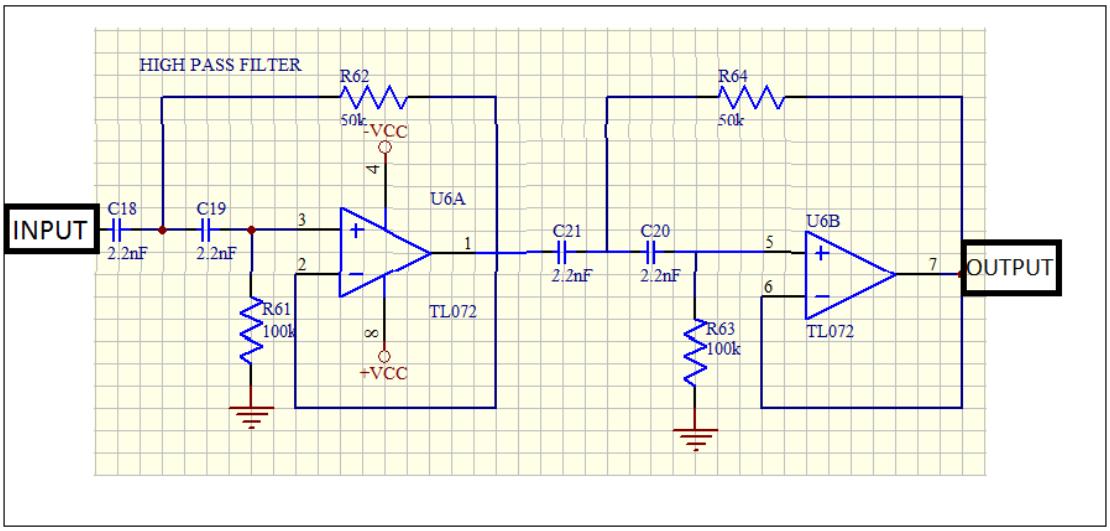
จากการออกแบบวงจร Sallen-Key High Pass Filter ในบทที่ 3 ทำให้ได้วงจร Sallen-Key High Pass Filter 1.3kHz และที่ใช้สำหรับกรองความถี่ต่ำ ในวงจร Multiband Compressor ซึ่งขั้นตอนการหา Sallen-Key High Pass Filter มีวิธีการดังนี้

4.4.1 วิธีการหาความถี่ของวงจร Sallen-Key High Pass Filter1.3 kHz ขึ้นไป

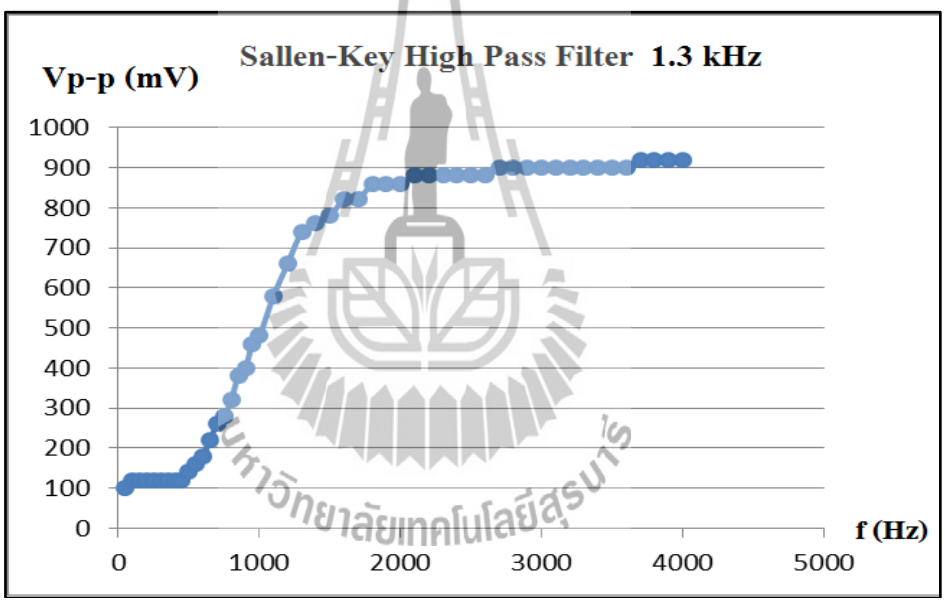
1.สร้างสัญญาณ Sine ตั้งแต่ 20Hz – 4 kHz เข้าที่ Input แรงดัน 1 Vp-pของวงจร Sallen-Key High Pass Filter 1.3kHz

2. ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณOutput ในหน่วยของ Vp-p ที่วงจร High Pass Filter 1.3kHz ขึ้นไป

3. บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์



รูปที่ 4.7วงจรSallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz



รูปที่ 4.8แสดงผลการทดสอบ Sallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz

จากผลการทดสอบ Sallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz จะสามารถคำนวณหาค่า Cutoff-Frequency ได้ดังนี้

4.4.2 วิธีการคำนวณหา Cutoff Frequency ของ Sallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz

จากผลการทดสอบ Sallen-Key High Pass Filter 1.3 kHzสามารถคำนวณ หาCutoff Frequency ได้จากสมการที่(4.1)

$$dB = 20\log V_{max} - 3dB \quad \text{(4.1)}$$

$$dB = 20\log 0.92 - 3\ dB$$

dB = -0.724 - 3 dB

dB = -3.724 dB

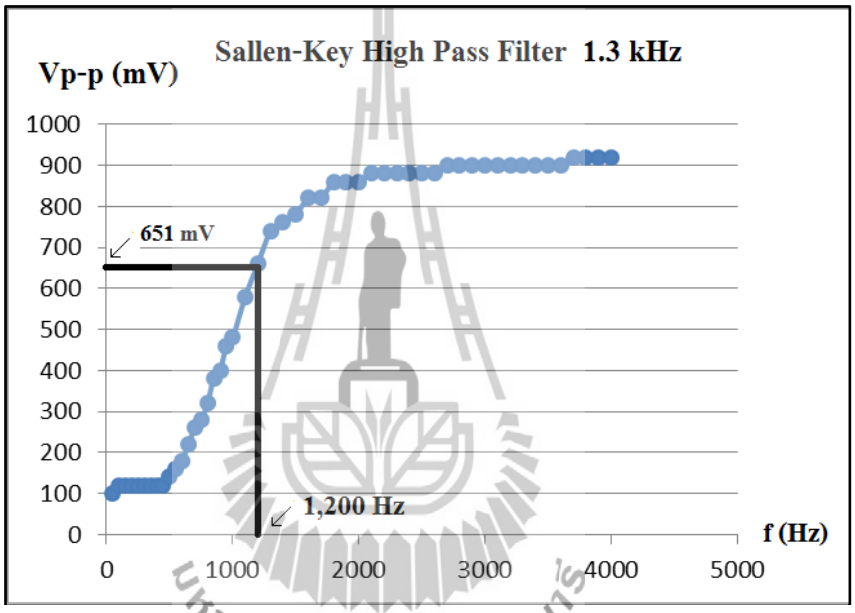
เปลี่ยน dB เป็น V p–p

dB = 20log Vp-p

-3.651 = 20log Vp-p

ดังนั้น V p–p = 651mV

จากผลการทดสอบ Sallen-Key High Pass Filter 1.3kHz จะสามารถคำนวณหาค่า Cutoff-Frequency ได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 Cutoff Frequency ของวงจร Sallen-Key High Pass Filter 1.3 kHz

4.5ผลการทดสอบวงจรLevel Detector

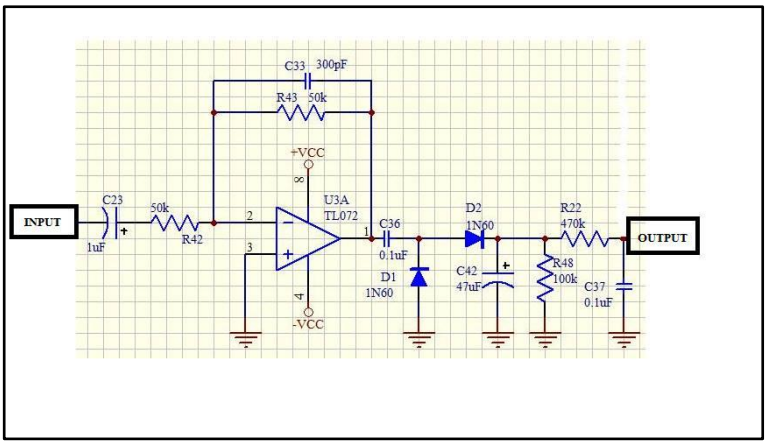
การทดสอบวงจร Level Detector แบ่งออกเป็น 3 ย่านความถี่เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน Vp-p ของสัญญาณ Input และสัญญาณ DC ที่ได้จากวงจรLevel Detector ซึ่งขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันมีวิธีการดังนี้

4.5.1 วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน Vp-p ของสัญญาณ Input และสัญญาณ DC

1.สร้างสัญญาณ Sine ความถี่1 kHz เข้าที่Inputมี Amplitude ตั้งแต่ 0-2Vp-p

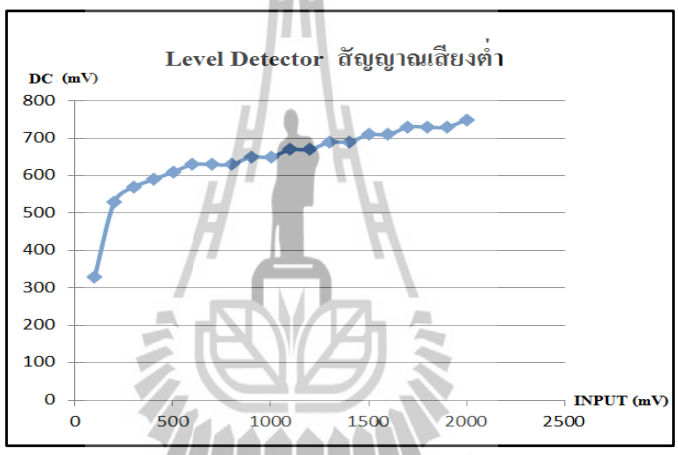
2.ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณ Output ในหน่วยของ Vp-pที่วงจรLevel Detector

3.บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์



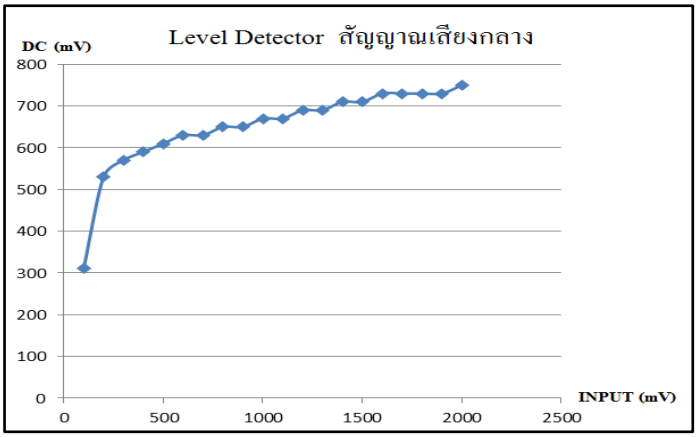
รูปที่ 4.10แสดงขั้นตอนการหา Level Detector

จากนั้นนำผลทดสอบที่ได้มาพล๊อตกราฟLevel Detectorสัญญาณเสียงต่ำจะได้ดังรูปที่ 4.11



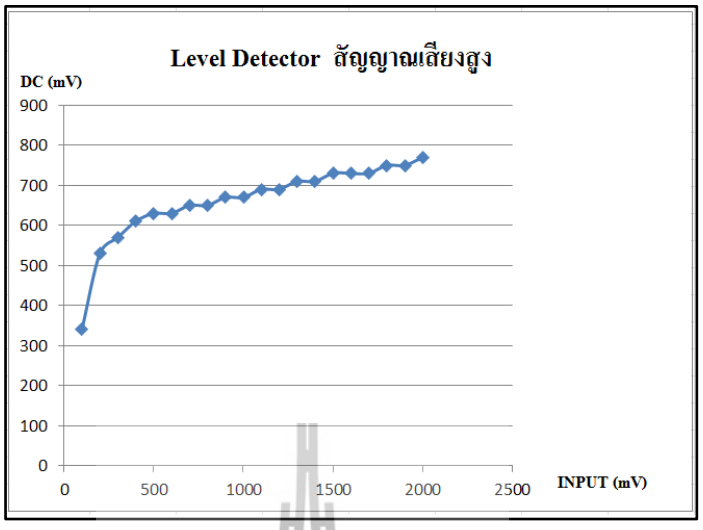
รูปที่ 4.11แสดงผลการทดสอบ Level Detectorสัญญาณเสียงต่ำ

จากนั้นนำผลทดสอบที่ได้มาพล๊อตกราฟ Level Detector สัญญาณเสียงกลางจะได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่4.12แสดงผลการทดสอบLevel Detector สัญญาณเสียงกลาง

จากนั้นนำผลทดสอบที่ได้มาพล๊อตกราฟLevel Detectorสัญญาณเสียงสูงจะได้ดังรูปที่ 4.13

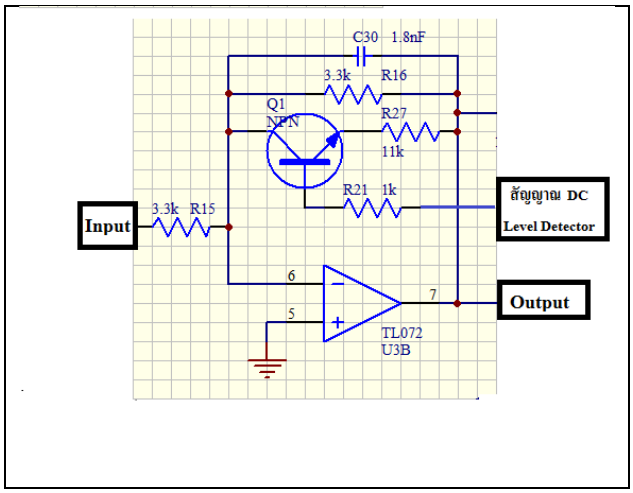


รูปที่ 4.13แสดงผลการทดสอบLevel Detector สัญญาณเสียงสูง

4.6ผลการทดสอบวงจรCompressor

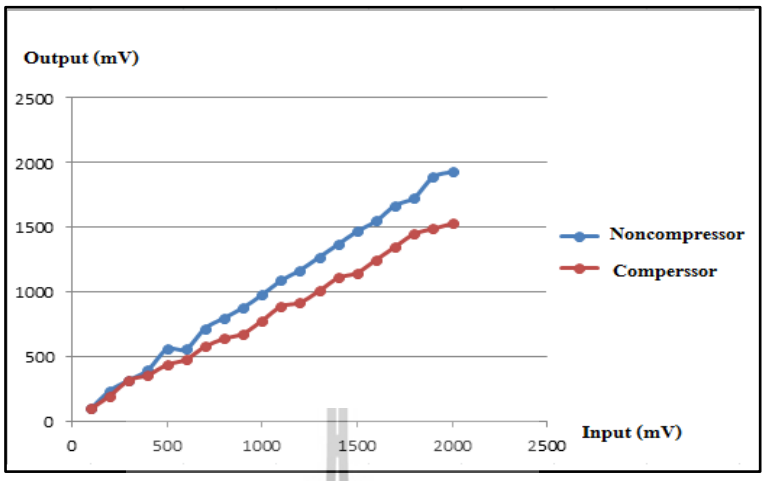
การทดสอบวงจร Compressor เพื่อหาอัตราขยายในการบีบอัดสัญญาณเสียง ให้เป็นไปตามทฤษฎีจะแบ่งออกเป็น 3 ย่านความถี่ คือ1. สัญญาณเสียงต่ำความถี่ไม่เกิน 400 Hz2.สัญญาณเสียงกลางความถี่ 400Hzถึง1.3 kHz3. สัญญาณเสียงสูงความถี่ตั้งแต่1.3 kHzขึ้นไปแล้วมีสัญญาณเอาต์พุตของวงจร Compressor ส่วนหนึ่งส่งไปที่ วงจร Level Detector เพื่อทำการวัดระดับแรงดันของสัญญาณแล้วส่งไปไบแอสขาเบสของทรานซิสเตอร์แต่ละย่านความถี่เพื่อบีบอัดสัญญาณเสียงในแต่ละย่านความถี่ดังรูปด้านล่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

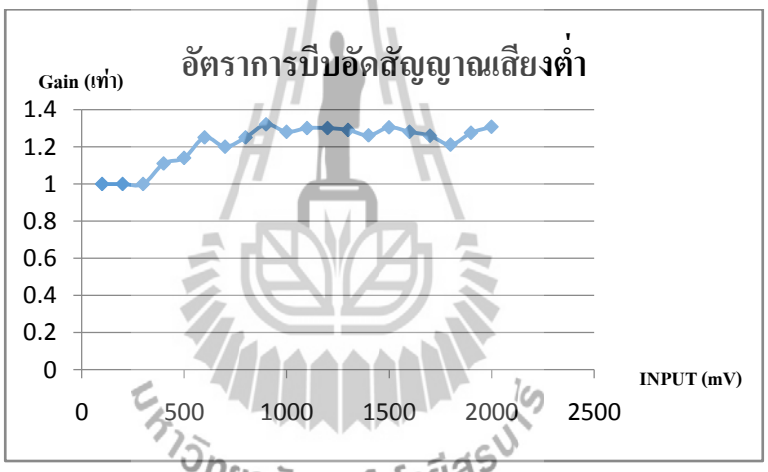


รูปที่ 4.14แสดงขั้นตอนการหา Compressor

สังเกตว่าถ้า Input ไม่เกิน 300 mV จะยังไม่ทำการบีบอัดสัญญาณเสียงแต่ถ้า Input เกิน 300 mV วงจรจะเริ่มทำการบีบอัดสัญญาณเสียงดังรูปที่ 4.15



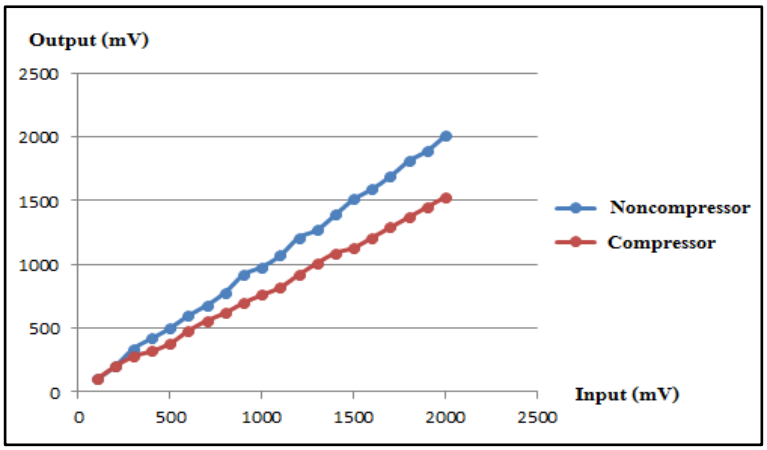
รูปที่ 4.15แสดงกราฟการหาCompressor สัญญาณเสียงต่ำ



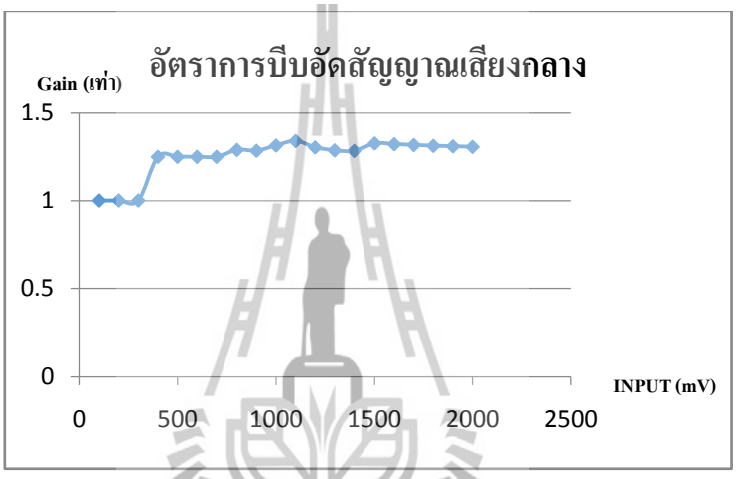
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 4.16แสดงกราฟการหาอัตราการบีบอัดสัญญาณเสียงต่ำ

สังเกตว่าถ้า Input ไม่เกิน 300 mV จะยังไม่ทำการบีบอัดสัญญาณเสียงแต่ถ้า Input เกิน 300 mV วงจรจะเริ่มทำการบีบอัดสัญญาณเสียงดังรูปที่ 4.16

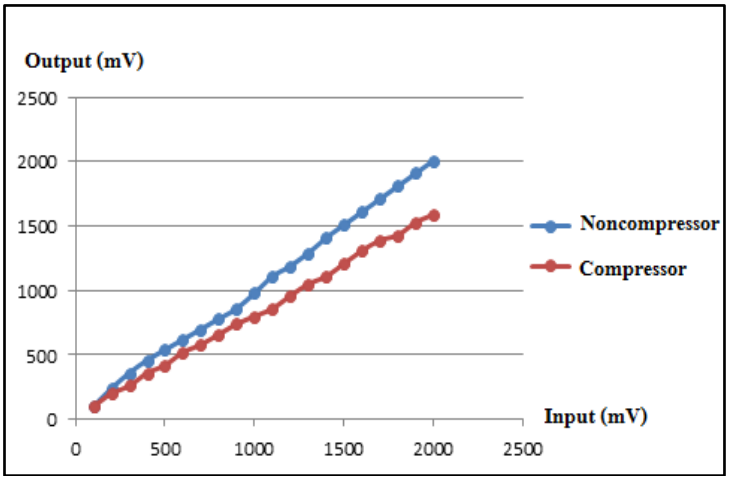


รูปที่ 4.17แสดงกราฟการหาCompressor สัญญาณเสียงกลาง

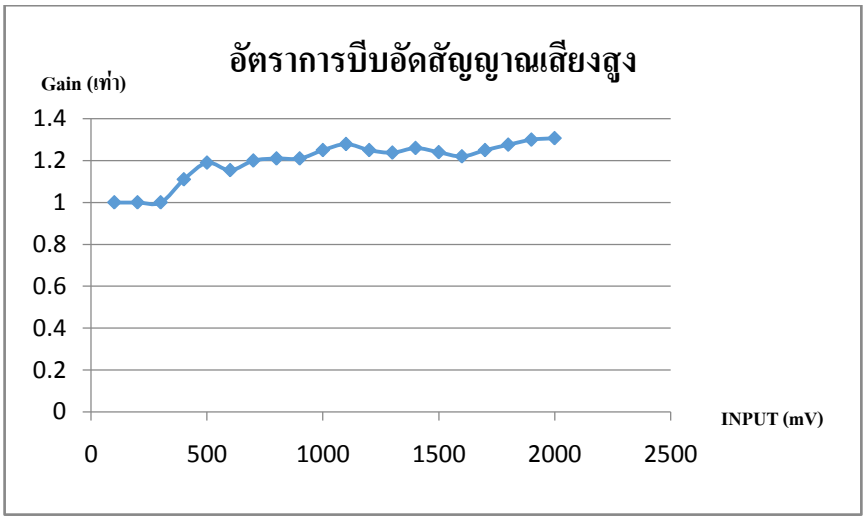


รูปที่ 4.18แสดงกราฟการหาอัตราการบีบอัดสัญญาณเสียงกลาง

สังเกตว่าถ้า Input ไม่เกิน 300 mV จะยังไม่ทำการบีบอัดสัญญาณเสียงแต่ถ้า Input เกิน 300 mV วงจรจะเริ่มทำการบีบอัดสัญญาณเสียงดังรูปที่ 4.19



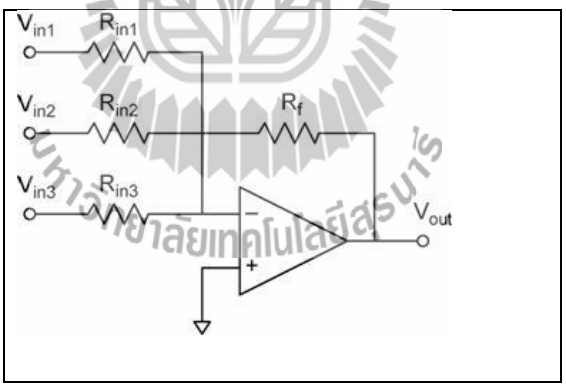
รูปที่ 4.19แสดงกราฟการหาCompressor สัญญาณเสียงสูง



รูปที่ 4.20แสดงกราฟการหาอัตราการบีบอัดสัญญาณเสียงสูง

4.7วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (Summing Amplifier)

เอาต์พุตที่ได้จากวงจร Compressor แต่ละย่านความถี่จะเป็นสัญญาณคนละสัญญาณกันซึ่งจะผ่านการ Compressor ในแต่ละย่านความถี่ที่ทำงานอิสระแยกจากกันดังนั้น จึงต้องทำการรวมสัญญาณเสียงในแต่ละย่านเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.21วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ

$$Vo=-\left(\frac{Rf}{R1}V1+\frac{Rf}{R2}V2+\frac{Rf}{R3}V3\right) \quad \text{.....(2.2)}$$

$R_f = 150\Omega$

$R_1 = 150\Omega$

$R_2 = 150\Omega$

$R_3 = 150\Omega$

$$Vo=-\left(\frac{150}{150}V1+\frac{150}{150}V2+\frac{150}{150}V3\right)$$

$$Vo=-(V1+V2+V3)$$

4.8ผลการทดสอบวงจรSallen-Key Low Pass Filter

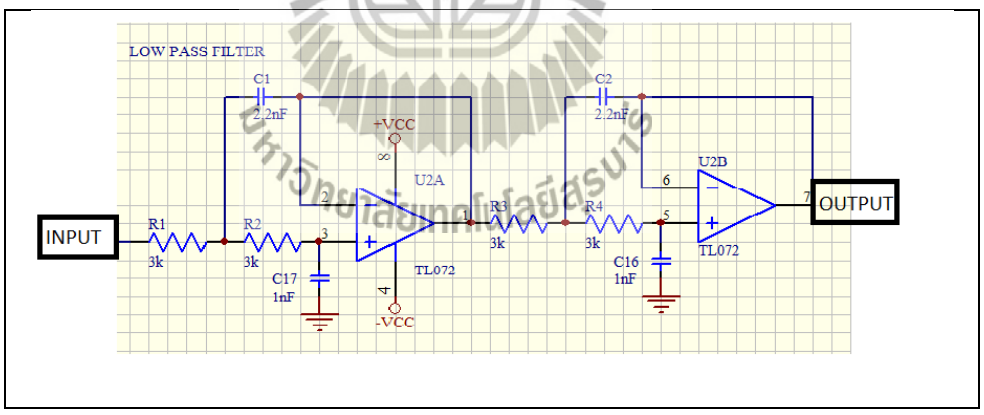
จากการออกแบบวงจรSallen-Key Low Pass Filter ในบทที่ 3 ทำให้ได้วงจร Sallen-Key Low Pass Filter 30kHz และที่ใช้สำหรับกรองความถี่ต่ำ ในวงจร Multiband Compressor ซึ่งขั้นตอนการหา Sallen-Key Low Pass Filter มีวิธีการดังนี้

4.8.1 วิธีการหาความถี่ของวงจร Sallen-Key Low Pass Filter 30 kHz

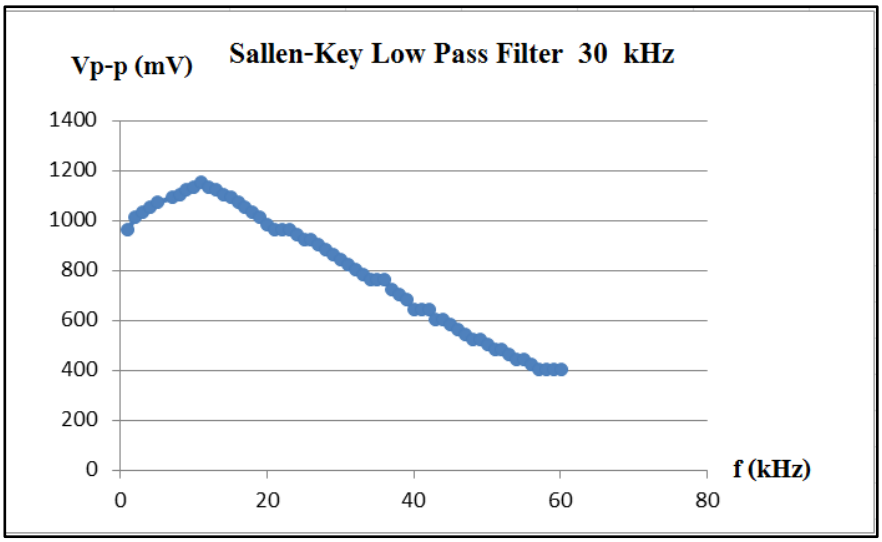
1.สร้างสัญญาณ Sine ตั้งแต่ 50Hz –60 kHz เข้าที่ Input แรงดัน 1 Vp-pของวงจร Sallen-Key Low Pass Filter400 Hz

2. ใช้ OscilloscopeวัดสัญญาณOutputในหน่วยของ Vp-p ที่วงจร Low Pass Filter 30 kHz

3. บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์



รูปที่ 4.22วงจรSallen-KeyLow Pass Filter 30 kHz



รูปที่ 4.23แสดงผลการทดสอบSallen-Key Low Pass Filter 30 kHz

จากผลการทดสอบSallen-Key Low Pass Filter 30 kHz จะสามารถคำนวณหาค่า Cutoff Frequency ได้ดังนี้

4.8.2 วิธีการคำนวณหาCutoff Frequency ของ Sallen-Key Low Pass Filter 30 kHz

จากผลการทดสอบ Sallen-Key Low Pass Filter 30 kHz สามารถคำนวณหาCutoff Frequency ได้จากสมการที่ (4.1)

dB = 20logVmax – 3dB..... (4.1)

dB = 20log 1.15 – 3 dB

dB = 1.213 – 3 dB

dB = -1.786 dB

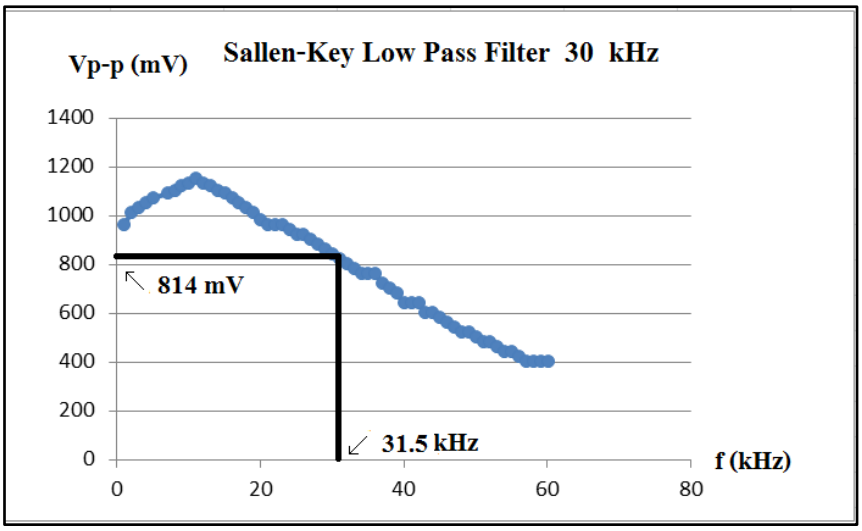
เปลี่ยน dB เป็น V p–p

dB = 20log Vp-p

-1.786 = 20log Vp-p

ดังนั้น V p–p = 814mV

จากผลการทดสอบSallen-Key Low Pass Filter 30 kHz จะสามารถคำนวณหาค่า Cutoff-Frequency ได้ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 Cutoff Frequencyของวงจร Sallen-Key Low Pass Filter 30 kHz

4.9ผลการทดสอบวงจรMultiband Compressor

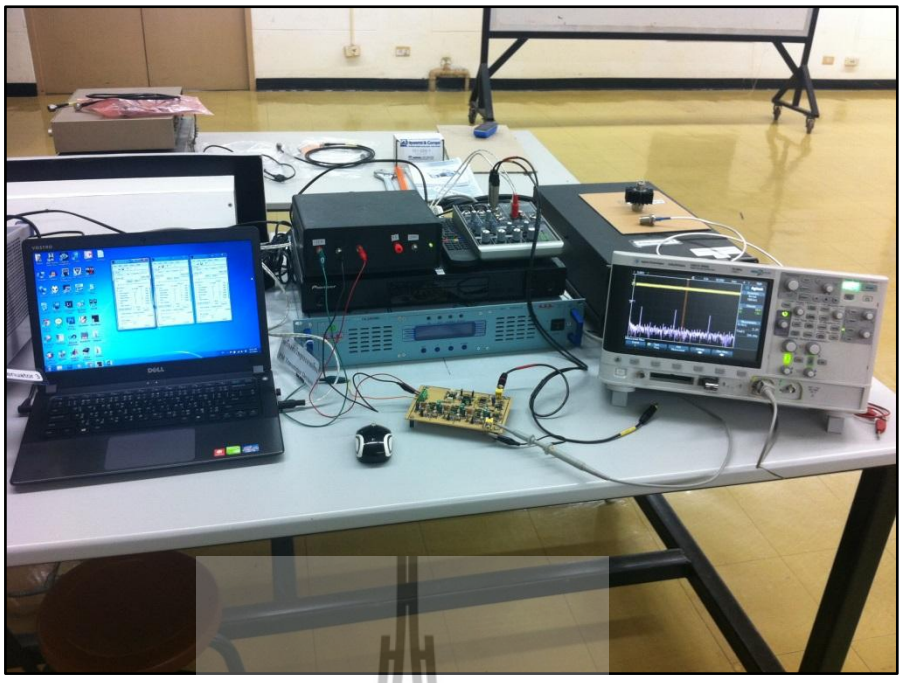
จากการออกแบบวงจรMultiband Compressorในบทที่ 3 ทำให้ได้วงจรกรองความถี่แบบหลายย่านความถี่ที่ทำงานอิสระต่อกันซึ่งขั้นตอนการหามีวิธีการดังนี้

4.9.1 วิธีการหาความถี่ของวงจร Multiband Compressor

1.สร้างสัญญาณ Sine 3 ย่านความถี่ คือ 200 Hz , 850 Hz ,1.5 kHzเข้าที่ Input แรงดัน 1 Vp-pของวงจร Multiband Compressor

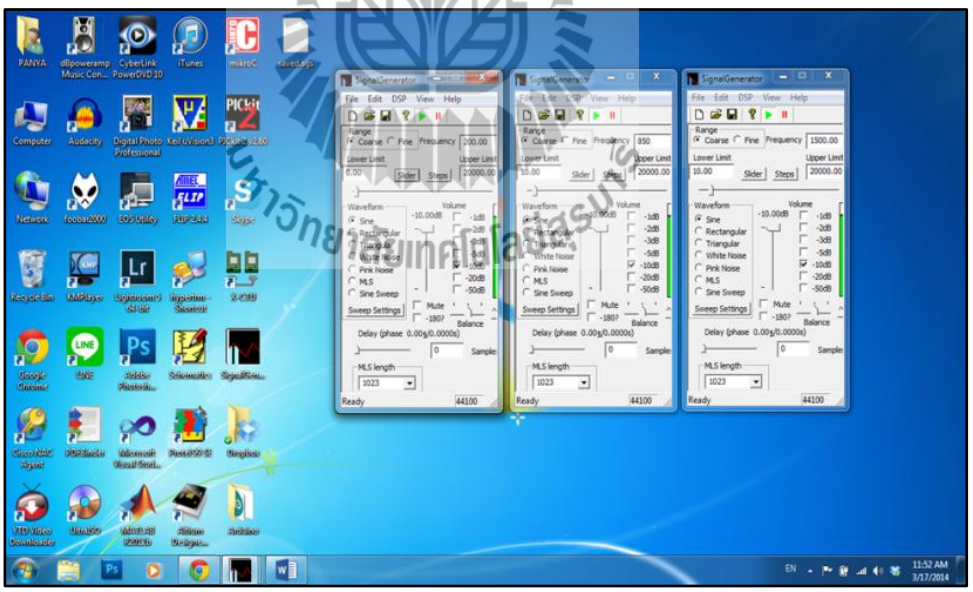
2. ใช้ OscilloscopeวัดสัญญาณOutputในหน่วยของ Vp-p ที่วงจร Multiband -Compressor

3. บันทึกผลการทดสอบและวิเคราะห์

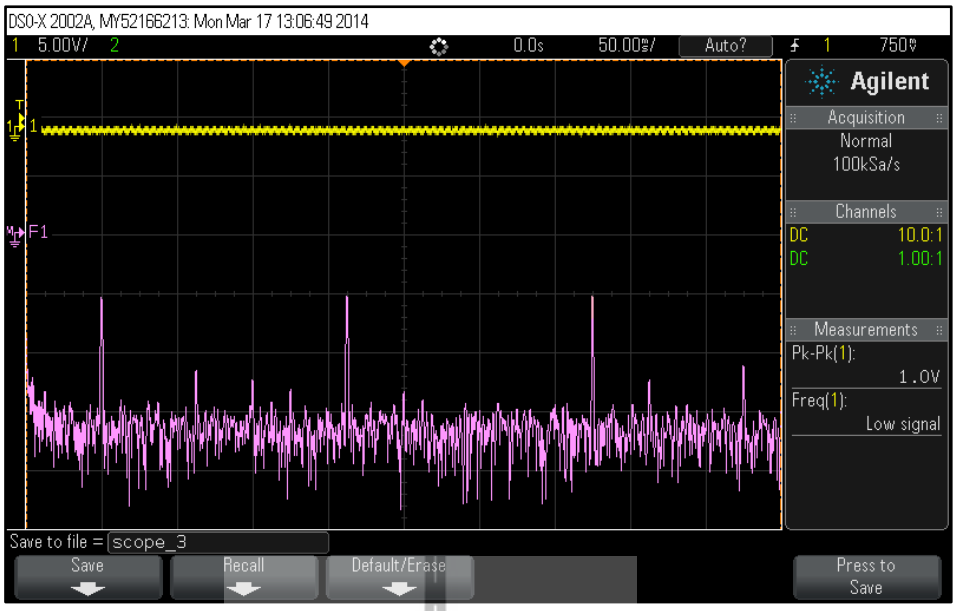


รูปที่ 4.25ทดสอบวงจร Multiband Compressor

1. สร้างสัญญาณ Sine 3 ย่านความถี่ คือ 200 Hz , 850 Hz ,1.5 kHz เข้าที่ Input ความแรงของสัญญาณที่-20 dBเท่ากันทุกย่านความถี่ ของวงจร Multiband Compressor ดังรูปที่ 4.26



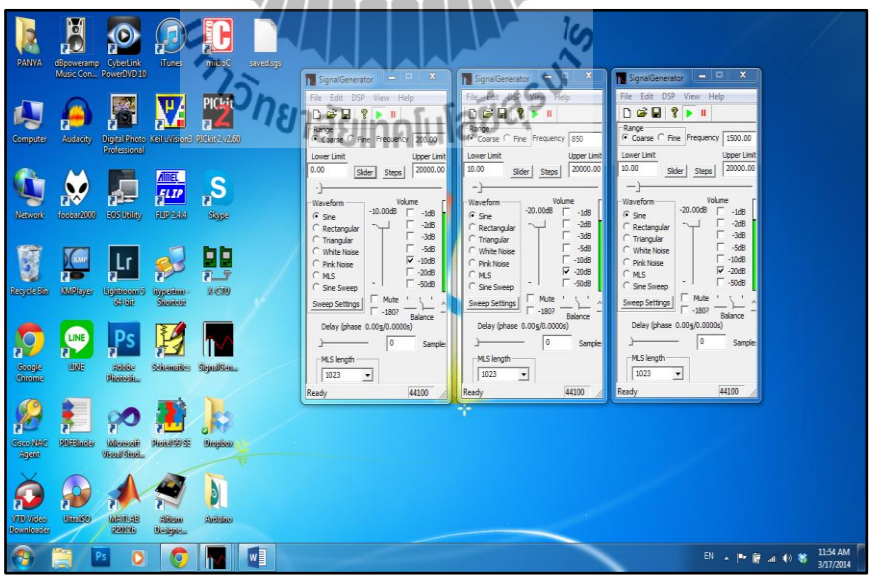
รูปที่ 4.26การทดสอบ Multiband Compressor



รูปที่ 4.27แสดงผลการทดสอบ Multiband Compressor

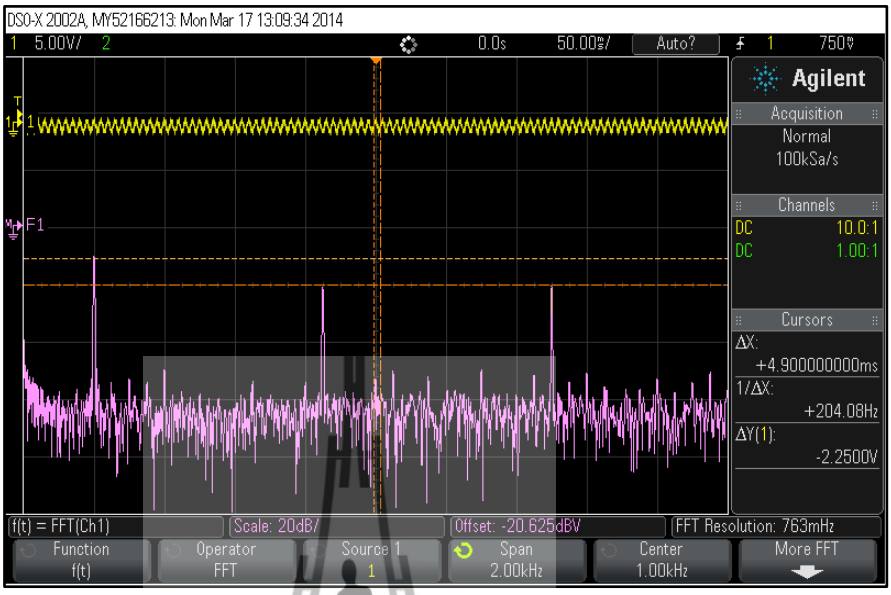
จากรูปที่ 4.27ผลการทดสอบวงจร Multiband Compressor จะสังเกตได้ว่าความแรงของสัญญาณมีขนาดเท่ากันในทุกย่านความถี่

2.สร้างสัญญาณ Sine 3 ย่านความถี่ คือ 200 Hz , 850 Hz ,1.5 kHz เข้าที่ Input ความแรงของสัญญาณต่ำที่ -10 dBเสียงกลางและเสียงสูงที่ -20 dB ของวงจร Multiband Compressor ดังรูปที่ 4.28



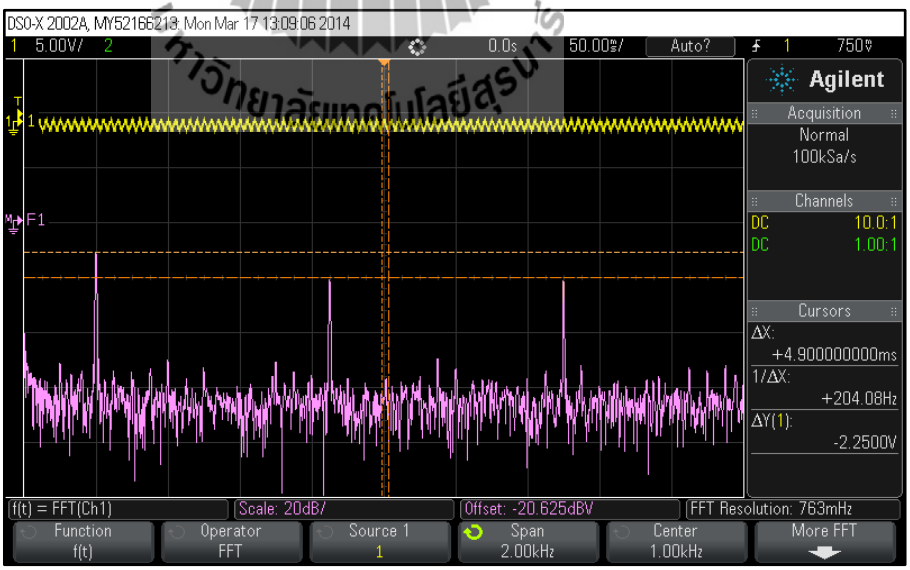
รูปที่ 4.28การทดสอบ Multiband Compressorสัญญาณเสียงต่ำ

ผลการทดสอบวงจร Multiband Compressor สัญญาณเสียงต่ำจะสังเกตได้ว่าความแรงของสัญญาณเสียงต่ำที่ -10 dB มีขนาดสัญญาณที่แรงกว่าสัญญาณเสียงกลางและเสียงสูงอยู่มากและยังไม่ทำการบีบอัดสัญญาณเสียงดังรูปที่ 4.29



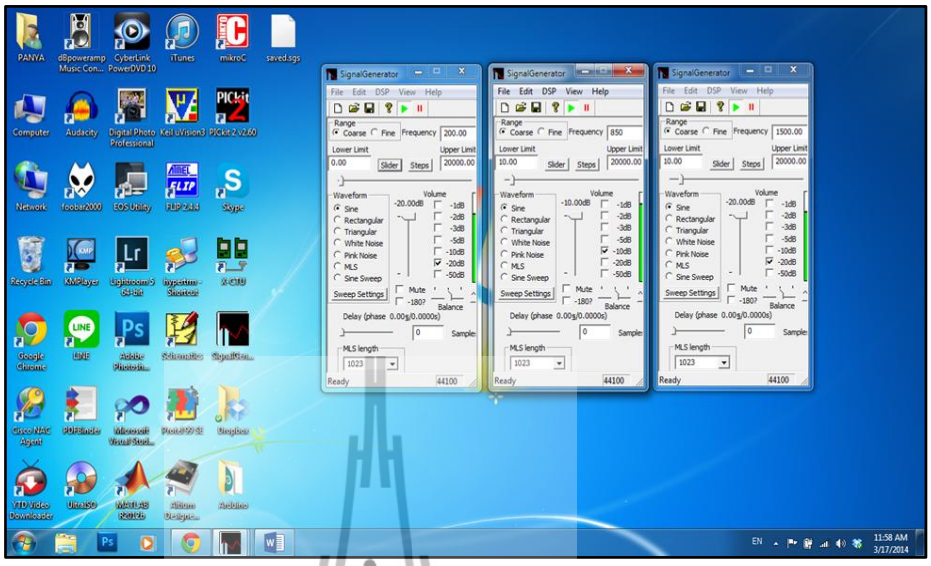
รูปที่ 4.29แสดงผลการทดสอบ Non-Compressor สัญญาณเสียงต่ำ

ผลการทดสอบวงจร Multiband Compressor สัญญาณเสียงต่ำจะสังเกตได้ว่าความแรงของสัญญาณเสียงต่ำที่ -10 dB มีขนาดสัญญาณลดลงเพราะมีการบีบอัดสัญญาณเสียงในขณะที่สัญญาณเสียงกลางและเสียงสูงยังมีความแรงของสัญญาณเท่าเดิมดังรูปที่ 4.30



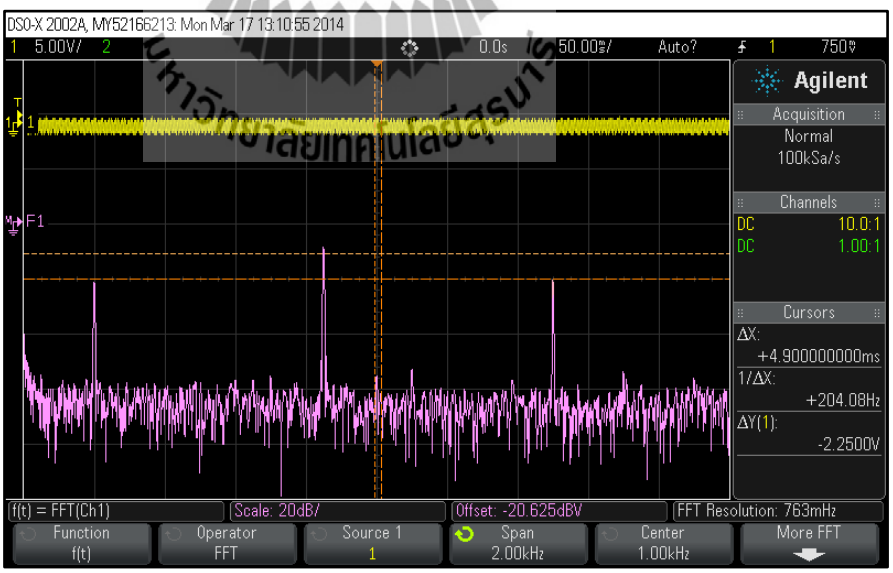
รูปที่ 4.30 แสดงผลการทดสอบ Compressor สัญญาณเสียงต่ำ

3.สร้างสัญญาณ Sine 3 ย่านความถี่ คือ 200 Hz , 850 Hz ,1.5 kHz เข้าที่ Input ความแรงของสัญญาณกลางที่ -10 dBเสียงต่ำและเสียงสูงที่ -20 dB ของวงจรMultiband Compressor ดังรูปที่ 4.31



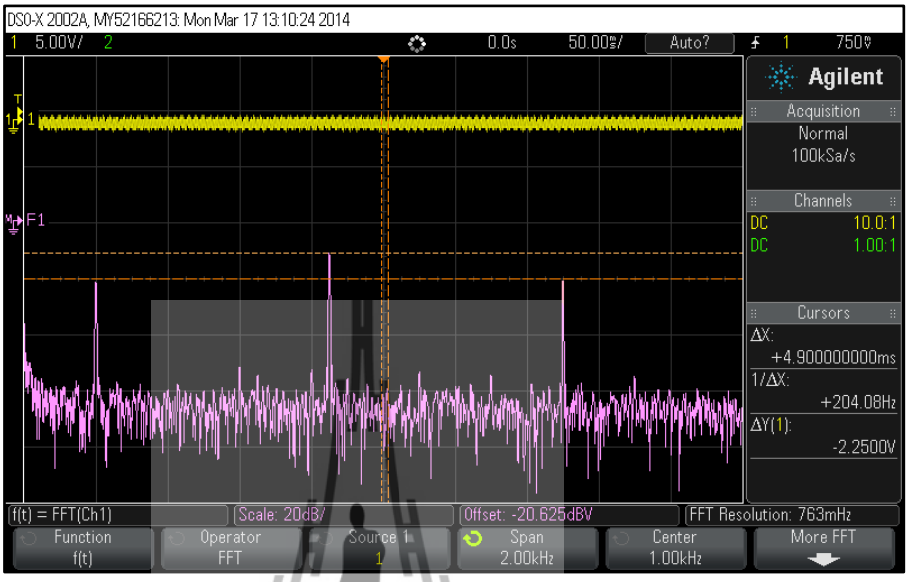
รูปที่ 4.31การทดสอบ Multiband Compressorสัญญาณเสียงกลาง

ผลการทดสอบวงจร Multiband Compressor สัญญาณเสียงกลางจะสังเกตได้ว่าความแรงของสัญญาณเสียงกลางที่ -10 dB มีขนาดสัญญาณที่แรงกว่าสัญญาณเสียงต่ำและเสียงสูงอยู่มากและยังไม่ทำการบีบอัดสัญญาณเสียงดังรูปที่ 4.32



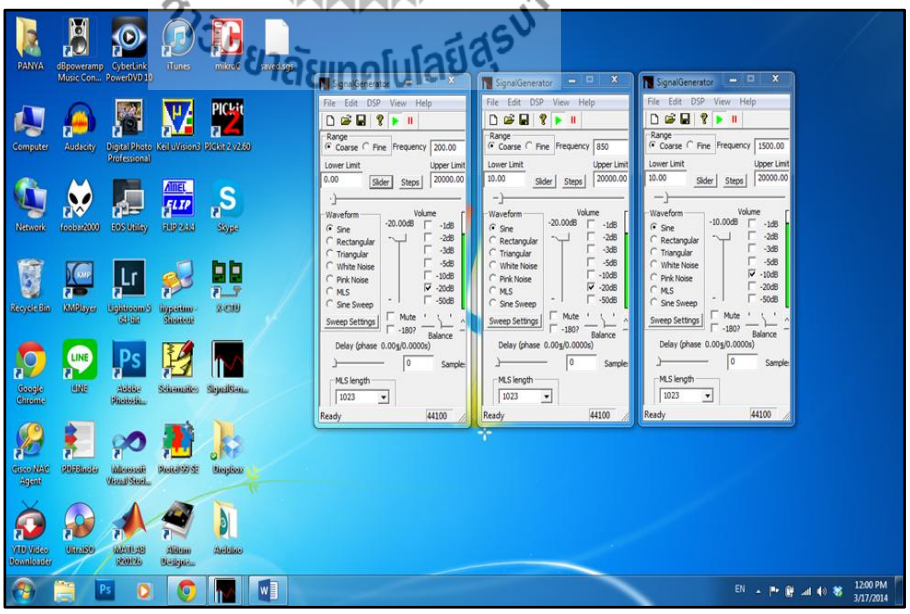
รูปที่ 4.32แสดงผลการทดสอบ Non-Compressor สัญญาณเสียงกลาง

ผลการทดสอบวงจร Multiband Compressor สัญญาณเสียงกลางจะสังเกตได้ว่าความแรงของสัญญาณเสียงกลางที่ -10 dB มีขนาดสัญญาณลดลงเพราะมีการบีบอัดสัญญาณเสียงในขณะที่สัญญาณเสียงต่ำและเสียงสูงยังมีความแรงของสัญญาณเท่าเดิมดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33แสดงผลการทดสอบ Compressor สัญญาณเสียงกลาง

4.สร้างสัญญาณ Sine 3 ย่านความถี่ คือ 200 Hz , 850 Hz ,1.5 kHzเข้าที่ Input ความแรงของสัญญาณสูงที่ -10 dBเสียงต่ำและเสียงกลางที่ -20 dB ของวงจร Multiband Compressor ดังรูปที่ 4.34

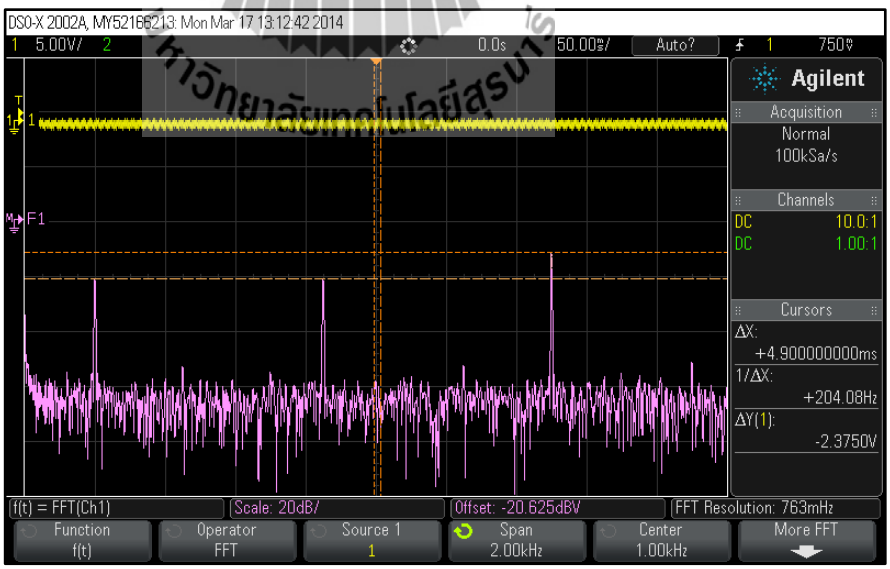


รูปที่ 4.34การทดสอบ Multiband Compressorสัญญาณเสียงสูง

ผลการทดสอบวงจร Multiband Compressor สัญญาณเสียงสูงจะสังเกตได้ว่าความแรงของสัญญาณเสียงสูงที่ -10 dB มีขนาดสัญญาณที่แรงกว่าสัญญาณเสียงต่ำและเสียงกลางอยู่มากและยังไม่ทำการบีบอัดสัญญาณเสียงดังรูปที่ 4.35

รูปที่ 4.35แสดงผลการทดสอบ Non-Compressor สัญญาณเสียงสูง

ผลการทดสอบวงจร Multiband Compressor สัญญาณเสียงสูงจะสังเกตได้ว่าความแรงของสัญญาณเสียงสูงที่ -10 dB มีขนาดสัญญาณลดลงเพราะมีการบีบอัดสัญญาณเสียงในขณะที่สัญญาณเสียงต่ำและเสียงกลางยังมีความแรงของสัญญาณเท่าเดิมดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36แสดงผลการทดสอบ Compressor สัญญาณเสียงสูง

บทที่ 5
สรุปผลการทดสอบ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

สืบเนื่องในปัจจุบันได้มีสถานีวิทยุกระจายเสียงในระบบ FM เกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย โดยส่วนใหญ่แล้วสถานีวิทยุจะใช้เครื่องส่งวิทยุ ที่ไม่ผ่านการรับรองมาตรฐานจากคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) จึงทำให้เกิดปัญหาในการส่งกระจายเสียง ทำให้เกิดการรบกวนในช่องความถี่ใกล้เคียง ซึ่งตามมาตรฐานของเครื่องส่ งวิทยุกระจายเสียงกำหนดให้มีค่า Peak Deviation ในขณะ Modulate จะต้องมีค่าไม่เกิน 75 kHz โดยค่า Peak Deviation จะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณ Input ถ้าสัญญาณแรงมากค่าจะส่งผลต่อค่า Peak Deviation สูงซึ่งจะทำให้เกินมาตรฐานที่กำหนด โดยทั่วไปการบีบอัดสัญญาณเสียงจะเป็นแบบบีบอัดสัญญาณทุกๆ ความถี่ในอัตราส่วนที่เท่ากันทำให้เกิดปัญหาคุณภาพเสียงของสัญญาณ Input ที่ต่ำ โดยช่วงความถี่ที่มีความแรงของสัญญาณไม่เกินขอบเขตที่กำหนดจะถูกลดทอนลงไป ด้วยตัวอย่าง เช่น หากมีขนาดของสัญญาณที่มีความถี่ต่ำ สูงกว่าขนาดสัญญาณความถี่กลางและความถี่สูงในรูปแบบการบีบอัดสัญญาณเสียงแบบเดิมจะทำการบีบอัดทุกๆ ย่านความถี่ในอัตราส่วนที่เท่ากัน จึงทำให้ความถี่สูงและความถี่กลางมีขนาดลดลงตามไปด้วยซึ่งทำให้เกิดปัญหาคุณภาพเสียงที่ต่ำลง ดังนั้นในโครงงานนี้เราจึงทำอุปกรณ์บีบอัดสัญญาณเสียง แบบหลายย่านความถี่ (Multiband Compressor) มีหลักการทำงานคือ สัญญาณเสียงที่ส่งเข้าสู่วงจรกรองความถี่แต่ละย่านมี 3 ย่านความถี่ 1. Sallen-Key Low Pass Filter เพื่อกรองความถี่ให้ไม่เกิน 400 Hz 2. Sallen-key Band Pass Filter เพื่อกรองสัญญาณความถี่ 400 Hz ถึง 1.3 kHz 3. Sallen-key High Pass Filter เพื่อกรองความถี่ตั้งแต่ 1.3 kHz ขึ้นไปแล้ววงจรแต่ละย่านความถี่จะทำงานเหมือนกันคือ สัญญาณดังกล่าวจะเข้าสู่วงจร Compressor เพื่อทำการบีบอัดสัญญาณเสียง วงจร Compressor มีความสามารถในการบีบอัดสัญญาณเสียงสูงสุด 1.3 เท่า แล้วส่งไปยังเอาต์พุท ก่อนทำการ Compressor ต้องตรวจสอบสัญญาณเสียงด้วย วงจร Level Detector โดยที่วงจร Level Detector จะเปลี่ยนจากสัญญาณ AC ให้เป็นสัญญาณ DC ตามความแรงของสัญญาณเอาต์พุทของวงจร Compressor จากนั้นสัญญาณ DC ดังกล่าวก็จะเข้าวงจร Compressor โดยสัญญาณ DC จะเข้าไปไบแอสขาเบสของทรานซิสเตอร์เพื่อกำหนดวงจรว่าจะบีบอัดสัญญาณเสียงขณะใดโดยถ้ามีสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากวงจร Compressor ต่ำกว่า 570 mV จะยังไม่ทำการบีบอัดสัญญาณเสียง แต่ถ้ามีสัญญาณเสียงเกิน 570 mV จะเริ่มทำการบีบอัดสัญญาณเสียง จากนั้นสัญญาณก็เข้าไปที่วงจร Summing Amplifier เพื่อรวมสัญญาณทั้งหมดแล้วส่งไปยังวงจร Sallen-Key Low Pass Filter

เพื่อกรองความถี่ไม่ให้เกิน 30 kHz เพื่อให้ได้คุณภาพเสียงที่ดีขึ้นและช่วยแก้ไขปัญหาที่กำลังเกิดขึ้นในปัจจุบัน

5.2 สิ่งที่ได้รับจากการทำโครงงาน

1. สามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้กับวงจรอื่นๆ ได้
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับการใช้งานโปรแกรม OrCAD และ Protel 99 se เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเนื้อหาที่เกี่ยวของกับโครงงานได้
3. สามารถวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำงานได้
4. ได้ฝึกความอดทน ความรับผิดชอบต่อตัวเอง

5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. วงจรบีบอัดสัญญาณเสียงไม่ได้ Gain = 1.30 เท่า ตามทฤษฎีที่ตั้งไว้ เนื่องจากอาจเป็นเพราะอุปกรณ์ตัวต้านทานมีค่า error 5% ทำให้ไม่ได้ค่าจริงตามที่ต้องการ เมื่อมาต่อรวมกันหลายตัว ค่า error ก็เยอะขึ้น ทำให้ Gain ไม่เป็นไปตามทฤษฎี
2. วงจรบีบอัดสัญญาณเสียงมีขีดจำกัดในการลดอัตราการขยายได้เพียง 1.3 เท่า ถ้าสัญญาณมาแรงเกิน ก็สามารถบีบอัดสัญญาณเสียงได้เพียง 1.3 เท่า ทำให้ประสิทธิภาพในการบีบอัดสัญญาณเสียงยังน้อยอยู่ ถ้าทำเกินนี้อัตราการบีบอัดสัญญาณเสียงจะไม่เกิดความลื่นไหลของสัญญาณเสียง
3. สามารถเพิ่มการใช้งานได้โดยการนำวงจร Multiband Compressor ไปต่อเข้ากับ Stereo-Encoder ต่อเข้า VCO ส่งออก Antenna ได้
4. สามารถนำวงจร Multiband Compressor ไปต่อกับลำโพง เพื่อป้องการเสียงลำโพงแตกได้

ประวัติผู้เขียน

นายถวัลย์สมบูรณ์

เกิดเมื่อวันที่ 1 กันยายนพ.ศ. 2534

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่56 หมู่ 2 ตำบลนาชุมแสง อำเภอทุ่งฝน

จังหวัดอุดรธานี41310

จบการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนหนองหานวิทยาปีการศึกษา 2552

ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4

สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จังหวัดนครราชสีมา

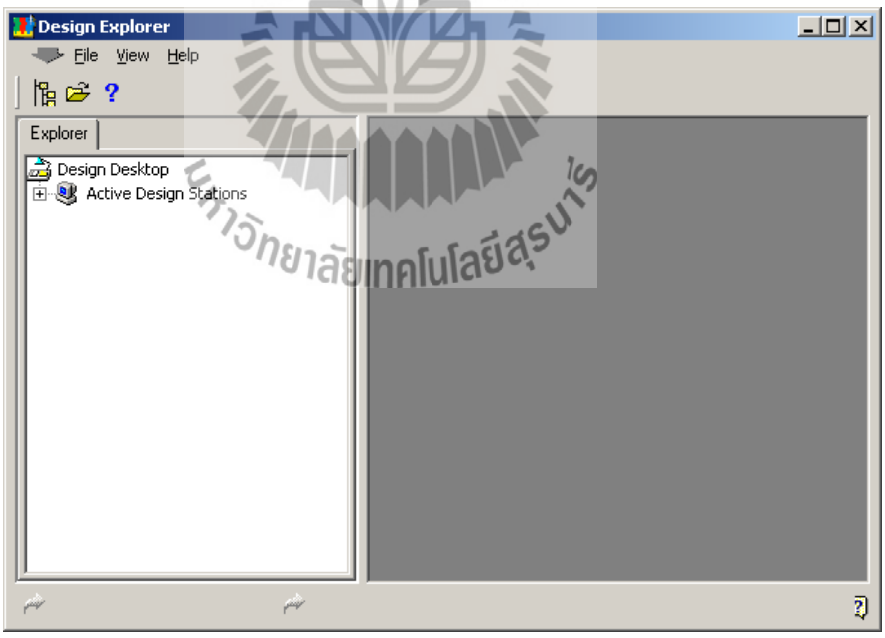
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก

การสร้าง New Design ของโปรแกรม Protel 99 se

1. เรียกใช้งานโปรแกรม Protel 99 SE โดยเลือก Start -> Programs ->Protel 99 SE จะปรากฏผลลัพธ์ดังภาพต่อไปนี้

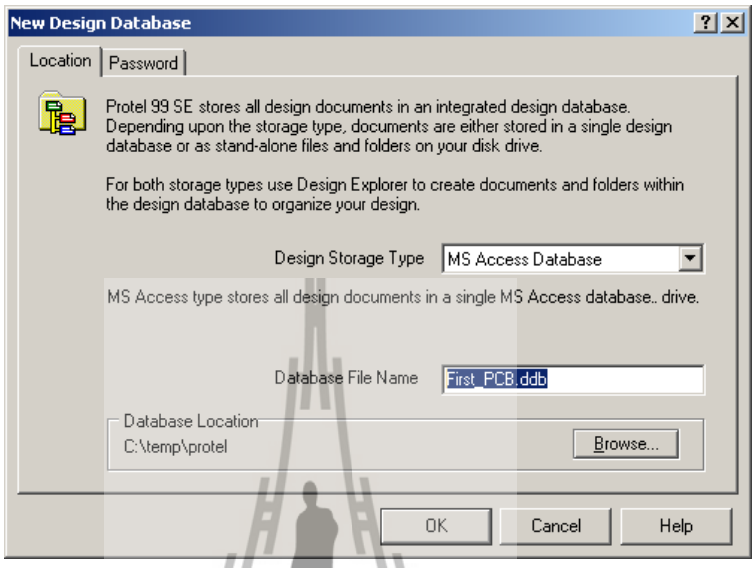
2. จะได้หน้าต่างโปรแกรม Protel99 SEดังนี้



รูปที่ 1หน้าเข้าโปรแกรมของโปรแกรม Protel 99 se

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3. หลังจากนั้นทำการสร้าง New Design ใหม่ขึ้นมาโดยคลิกที่ File --> New จะได้หน้าต่างดังรูป

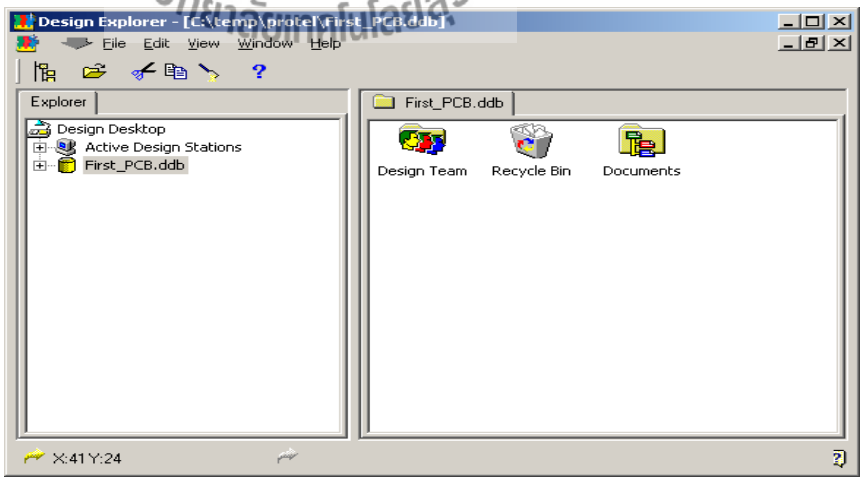


รูปที่ 2การสร้าง New Design

ตั้งชื่อ File และเลือก Location ที่ต้องการบันทึกข้อมูล

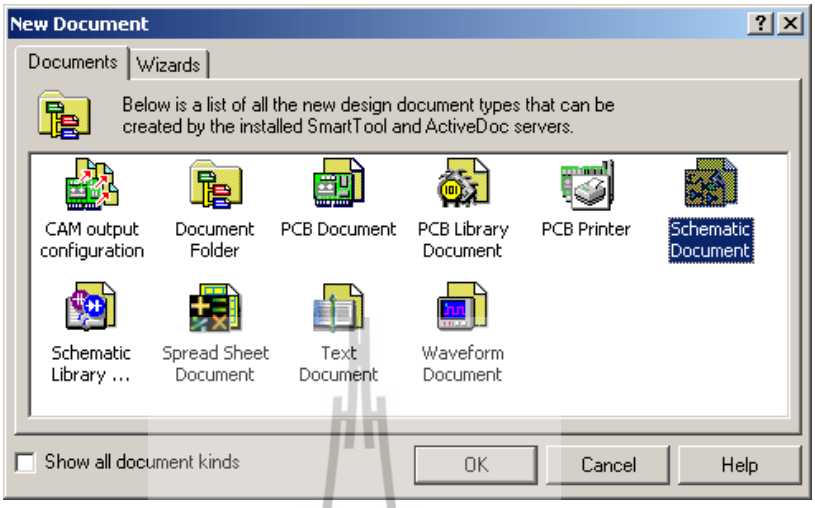
- ตั้งชื่อ File เป็น First_PCB.bbd

  เสร็จแล้วคลิก OK จะได้หน้าต่างดังรูป



รูปที่ 3 หน้าต่างการตั้งชื่อ File ชิ้นงาน

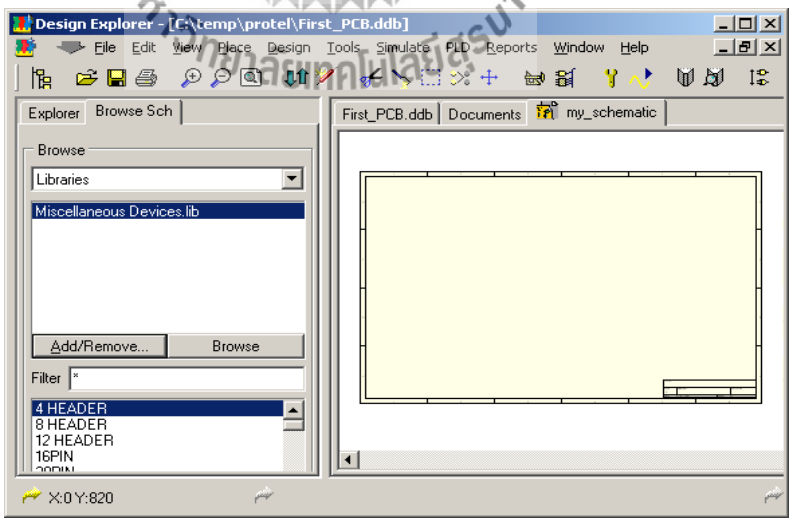
4. ไปที่ Folder Documents แล้วคลิกขวา เลือก NEW….



รูปที่ 4 เลือก Schematic Document

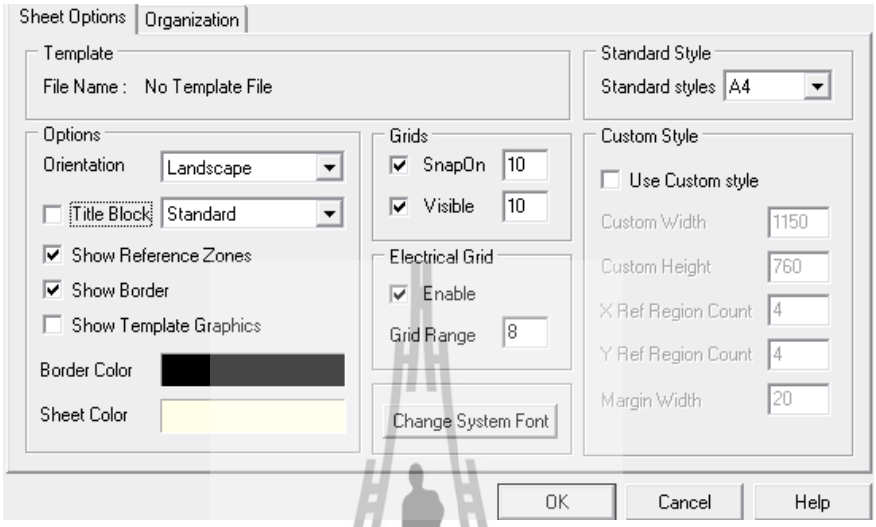
จะ ปรากฏ หน้าต่างดังรูปเลือก Schematic Document ทำการตั้งชื่อ Schematicเป็น my_schematic.Sch

5. หลังจากนั้นให้ท่านดับเบิ้ลคลิ๊กที่ไอคอนmy_schematic จะปรากฏหน้าต่างการทำงานดังต่อไปนี้



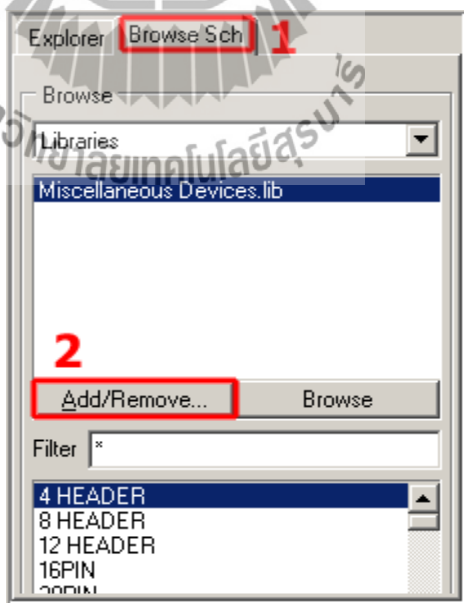
รูปที่ 5 File my_schematic.Sch

กำหนด Option ของ schematic โดยเลือกที่ Design --> Option



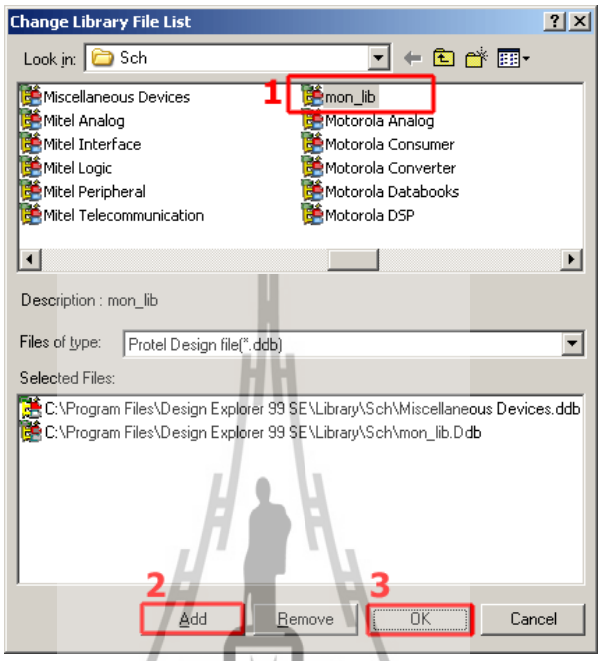
รูปที่ 6 หน้าต่างกำหนด Option ของ schematic

6. ทำการ Add library โดยการคลิกที่แท็บBrowse Sch -->คลิกที่ Add/Remove



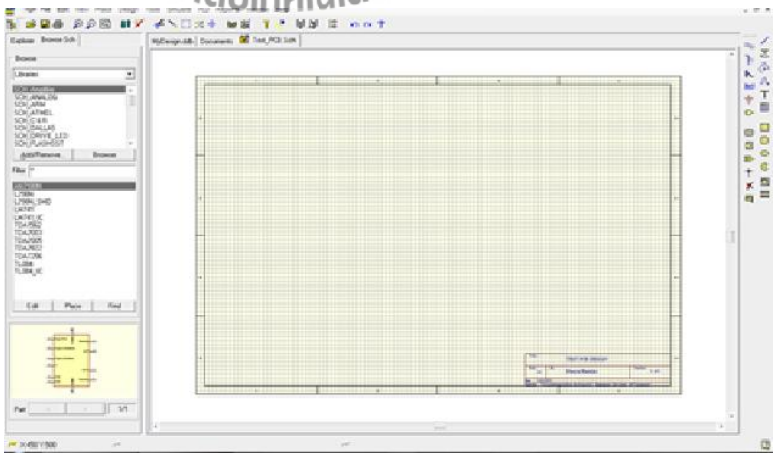
รูปที่ 7 การ Add library(1)

7. เลือกไฟล์ mon_lib.ddbจากนั้นคลิ๊กปุ่ม Addและตามด้วยปุ่ม OK



รูปที่8 การ Add library(2)

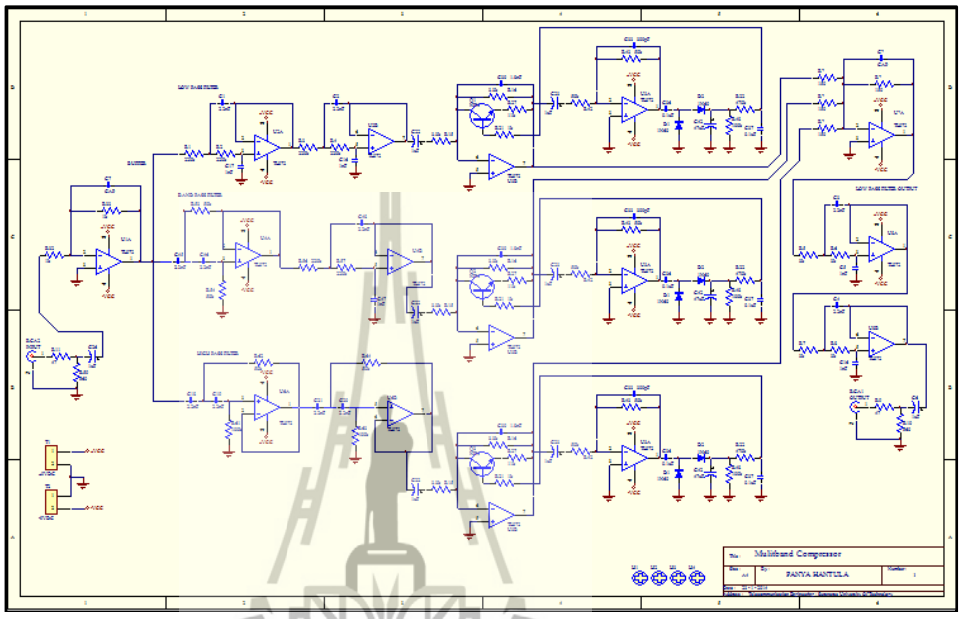
8. เมื่อทำการ Add Library เรียบร้อยแล้วจะเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ด้านซ้ายมือ ซึ่งสามารนำมาใช้งานได้โดยการคลิก แล้วนำมาวางที่ schematic



รูปที่ 9 อุปกรณ์Library

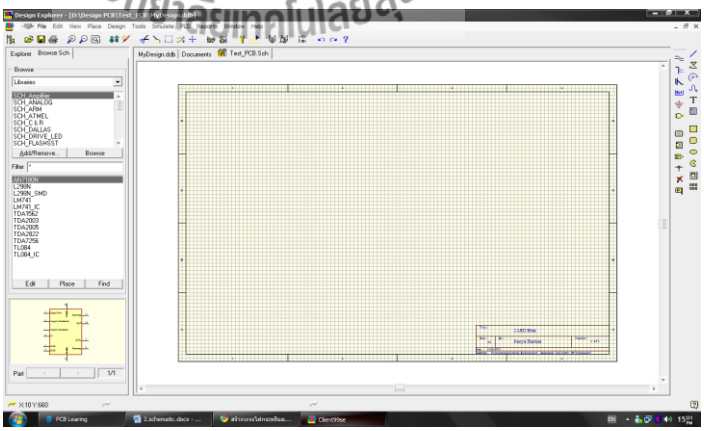
ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Protel99 se เพื่อใช้ในการออกแบบ PCB

เราจะทำการวาดวงจรที่เราต้องการออกแบบใน Schematic โดยจะทำการออกแบบตามวงจรตัวอย่างดังนี้



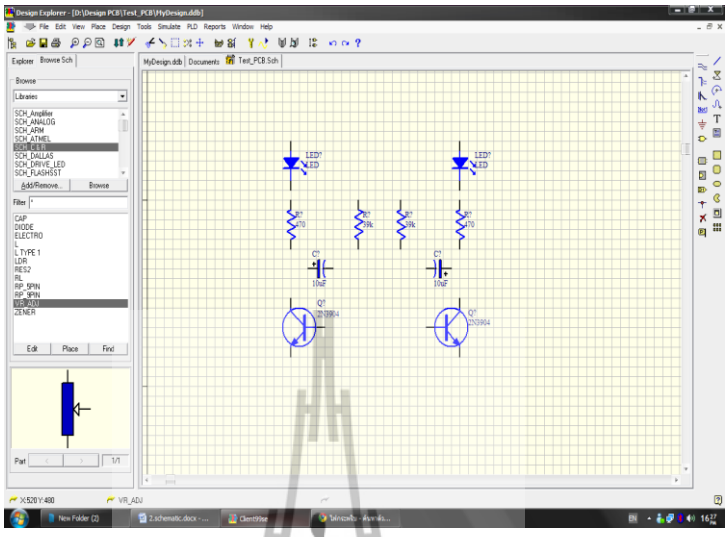
รูปที่10วงจรตัวอย่าง

1. สร้าง New Design ขึ้นมาตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้ว จะได้หน้าต่างดังรูป



รูปที่ 11หน้าต่างแสดงNew Design

1. จัดวางอุปกรณ์ตามวงจรตัวอย่าง



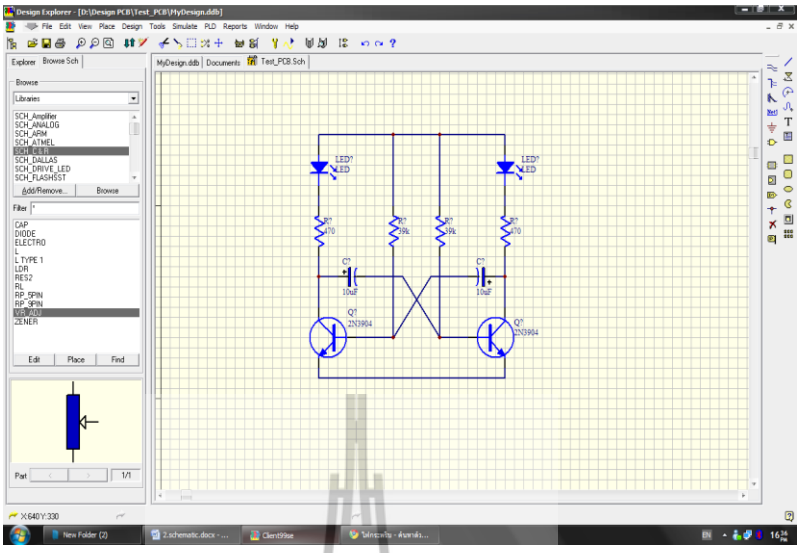
รูปที่ 12การจัดเรียงอุปกรณ์ตามวงจรที่ออกแบบไว้

คำสั่งพื้นฐานในการใช้งาน

- **Page Up** (Zoom In) , **Page Down** (Zoom Down)
- Key **X** --> Flip Horizontal ,Key **Y**--> Flip Vertical
- Key **Space Bar** --> Rotate

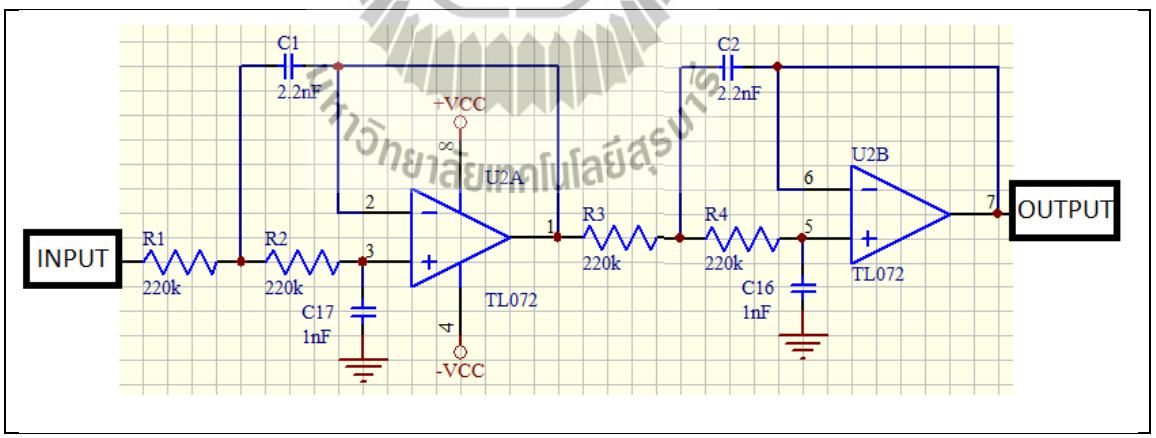
* หมายเหตุ ใน Library ที่ต่างกัน อุปกรณ์ที่นำมาวางจะ ไม่เหมือนกัน

2. เชื่อมต่ออุปกรณ์ด้วยคำสั่ง PlaceWireโดยคลิก Place --> Wire

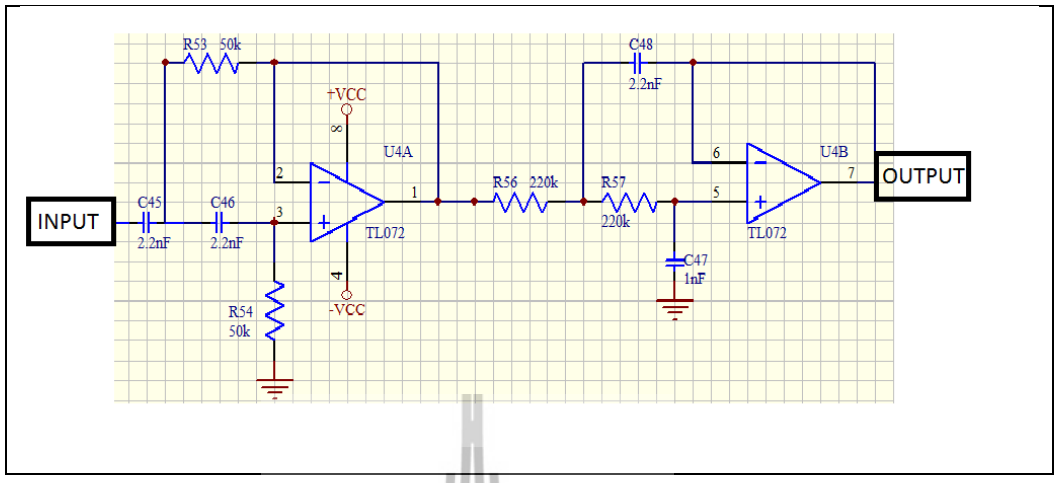


รูปที่ 13แสดงการเชื่อมต่อของวงจร

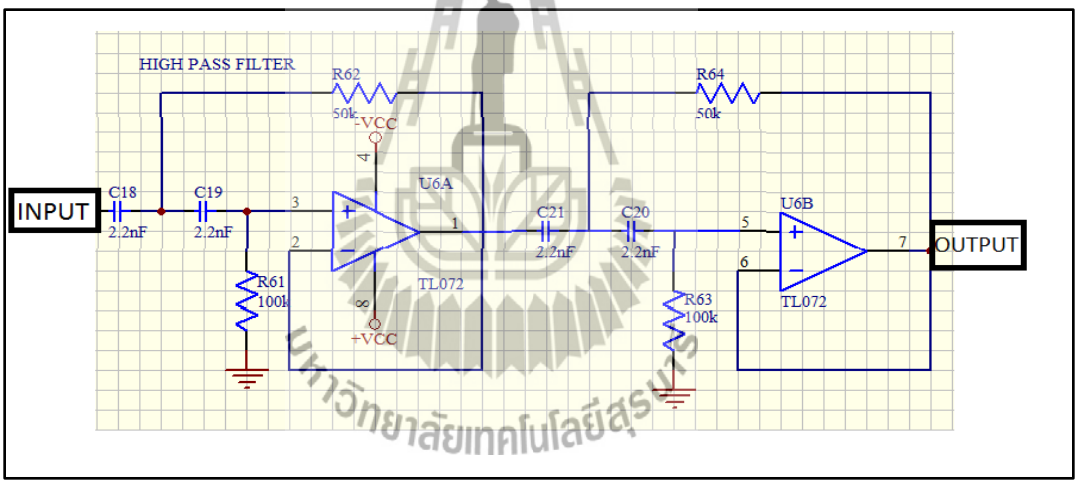
วงจรย่อยแต่ละส่วนที่เราต้องทำการออกแบบ โดยเชื่อมต่ออุปกรณ์แต่ละตัวเข้าด้วยกัน มีวงจรย่อยดังนี้ Low Pass Filter, Compressor,Level Detector ,Compartor , Microcontroller,Reculator



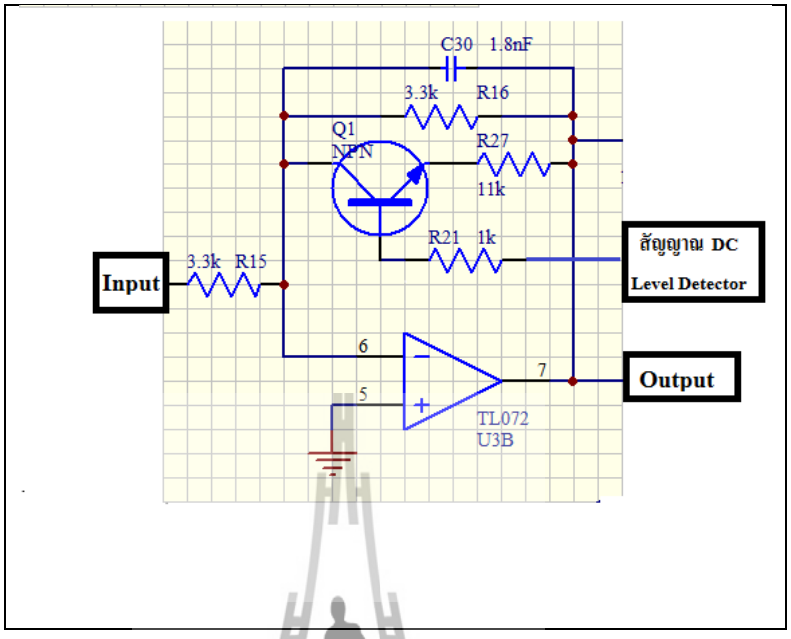
รูปที่ 14วงจรส่วน Sallen-Key Low Pass Filter



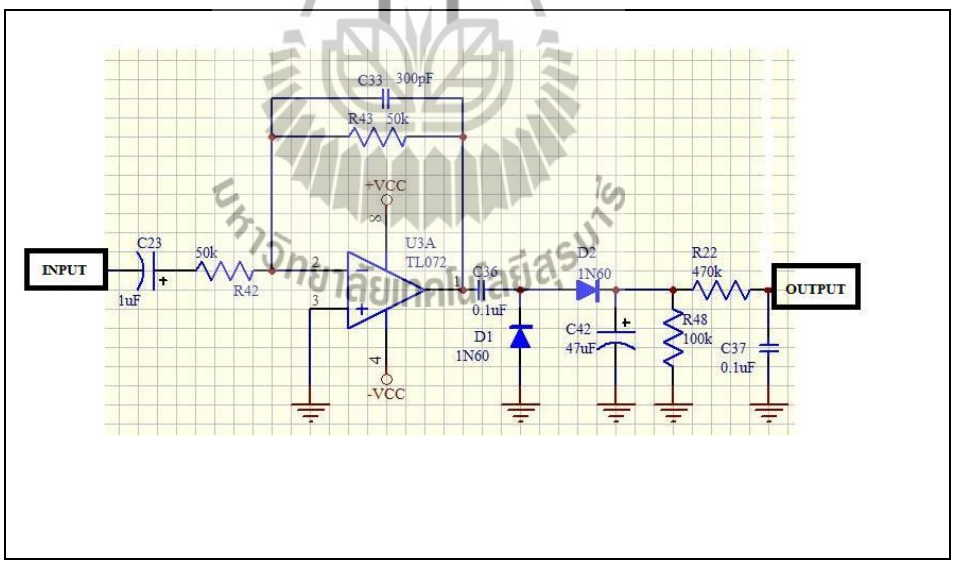
รูปที่ 15 วงจรส่วน Sallen-Key Band Pass Filter



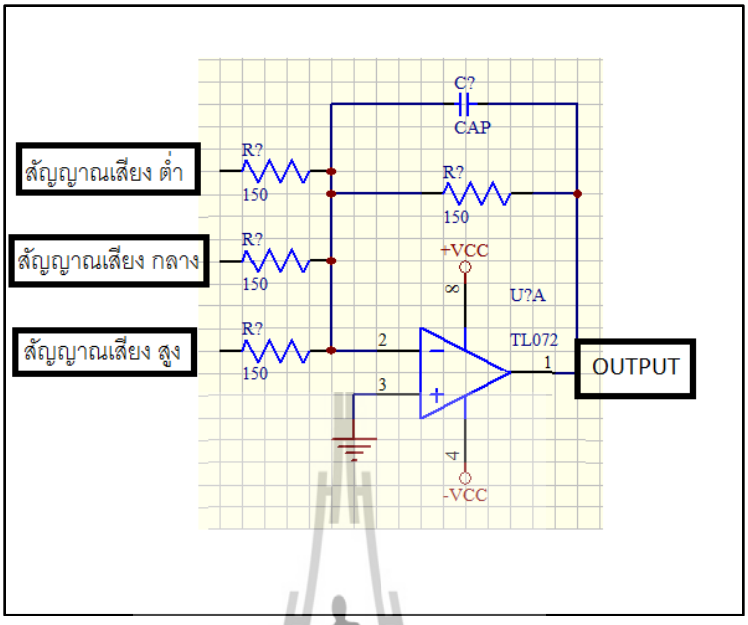
รูปที่ 16 วงจรส่วน Sallen-Key High Pass Filter



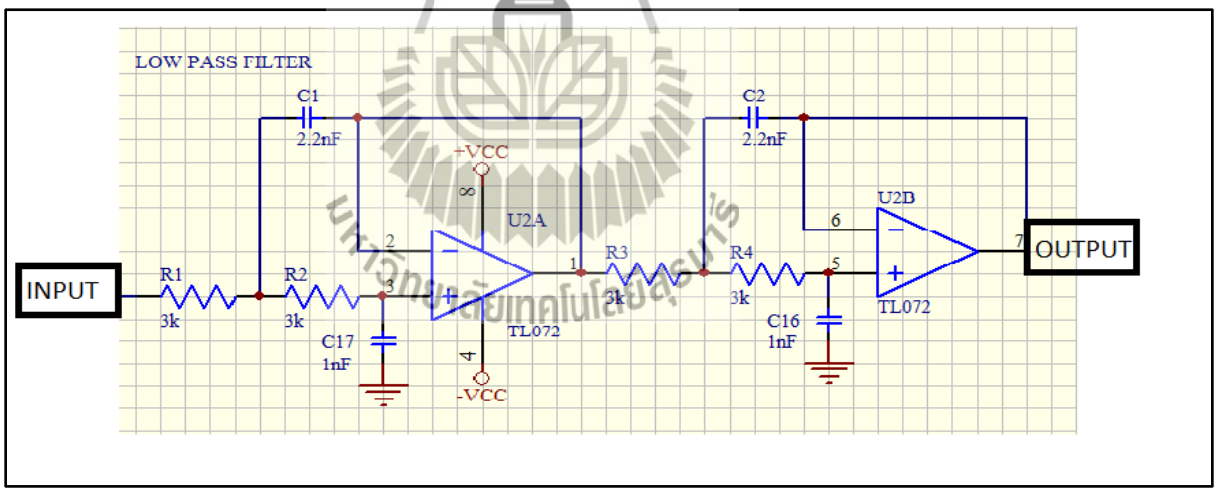
รูปที่ 17วงจรส่วน Compressor



รูปที่ 18วงจรส่วน Level Detector

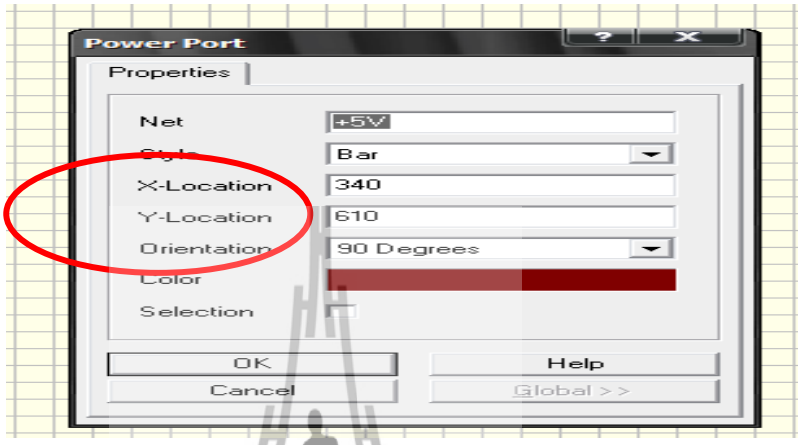


รูปที่ 19วงจรส่วน Summing Amplifier



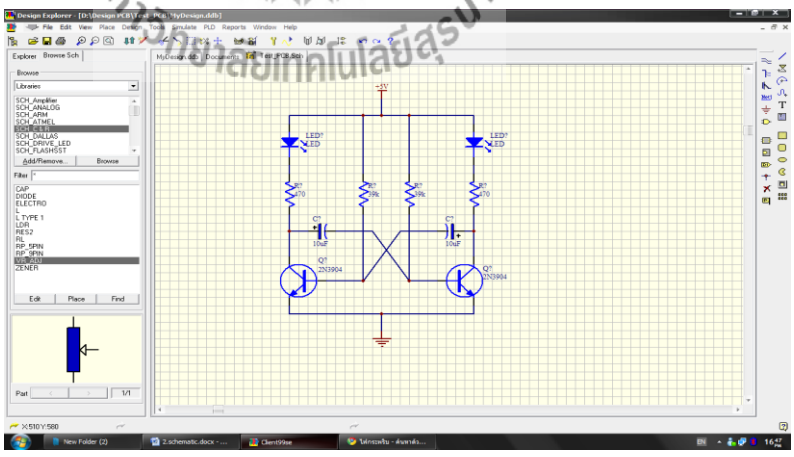
รูปที่ 18วงจรส่วน Sallen-Key Low Pass Filter

4.ใส่แหล่งจ่ายโดยใช้คำสั่ง Place --> Power Port เพื่อเลือกคำสั่ง Power Port แล้วกด Key Tab เพื่อกำหนดคุณสมบัติของ Power Port จะเห็นหน้าต่างดังรูป ใส่ในช่อง Net เป็น +5V และเลือก Style เป็น Bar



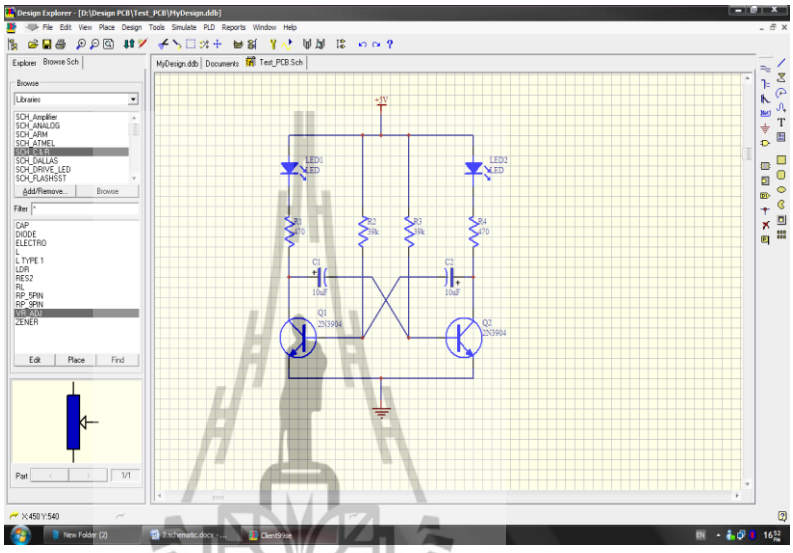
รูปที่ 20กำหนดค่า Power Port

5. เมื่อกำหนดแล้ว ให้เพิ่มลงในวงจร และในกรณีของ GND ก็ทำเช่นเดียวกับ เพียงแต่ใส่ในช่อง Net เป็น GND และเลือก Style เป็น Power Ground



รูปที่ 21กำหนด GND ลงในวงจร

6.ใช้คำสั่ง Annotate เพื่อตั้งชื่อของอุปกรณ์แต่ละตัวไม่ได้ซ้ำกัน โดยไปที่ Tool --> Annotate แล้วคลิก OK

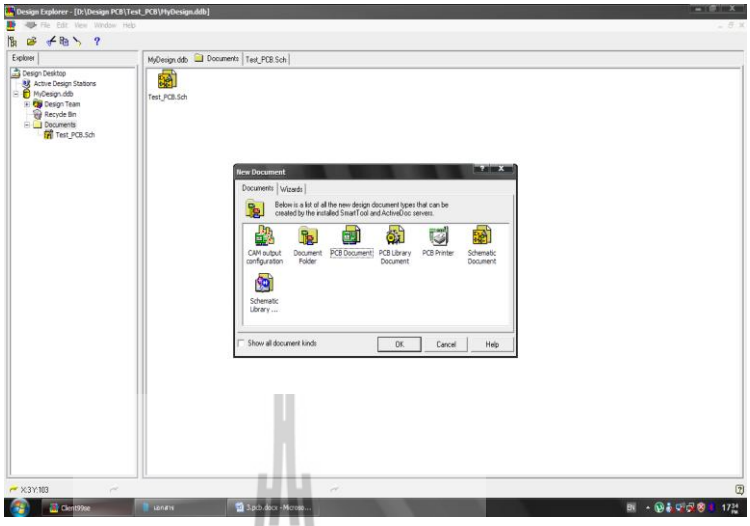


รูปที่ 22แสดงการใช้คำสั่ง Annotate

จะเห็นได้ว่า เราได้อุปกรณ์ครบถ้วน และยังมีการตั้งชื่อของอุปกรณ์แต่ละตัวด้วย ถือว่าเป็นการเสร็จในกระบวนการ schematic แล้ว

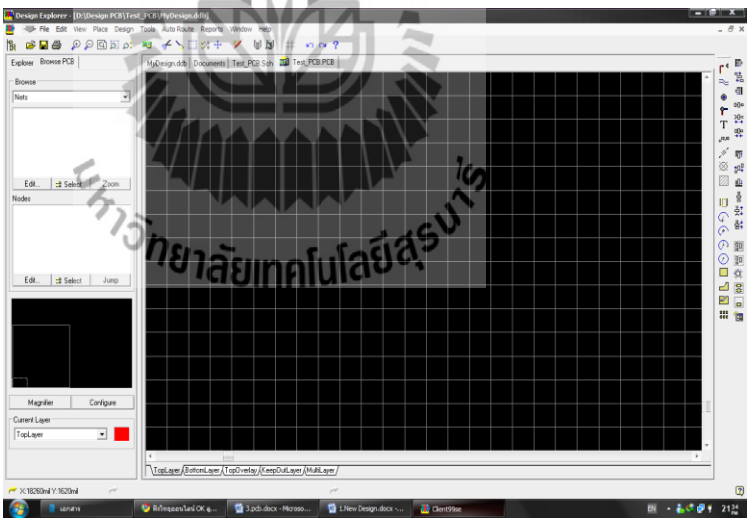
หลังจากที่ได้ออกแบบวงจรแบบ Schematic เราสามารถสร้าง Artwork ของ PCB ได้จาก Schematic ได้โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เปิด File ที่เราได้สร้าง Schematic จากนั้นไปที่ Folder Documents แล้วคลิกขวา เลือก NEW….เลือก PCB Documents และเปลี่ยนชื่อ File PCB เป็น Compressor.PCB



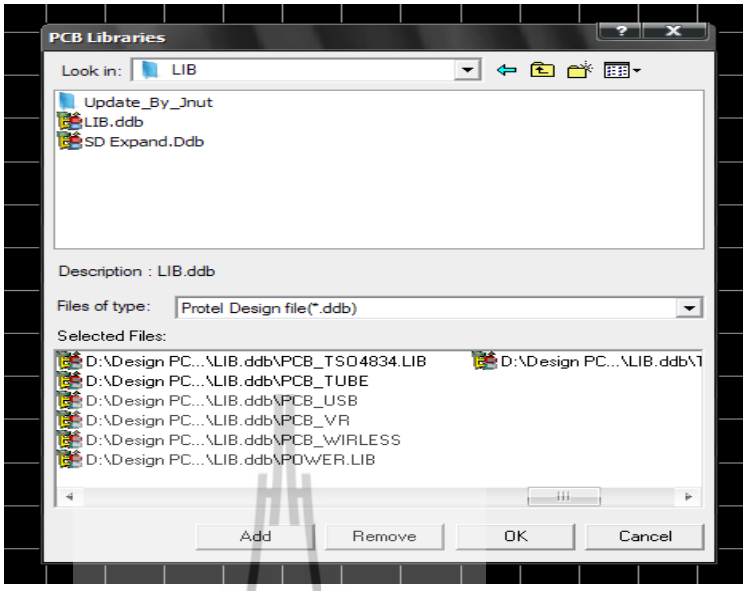
รูปที่ 23เปิดไฟล์ Schematic ที่ได้ออกแบบไว้

จากนั้นเปิด File Compressor.PCB ขึ้นมา จะเห็นหน้าต่างดังรูป



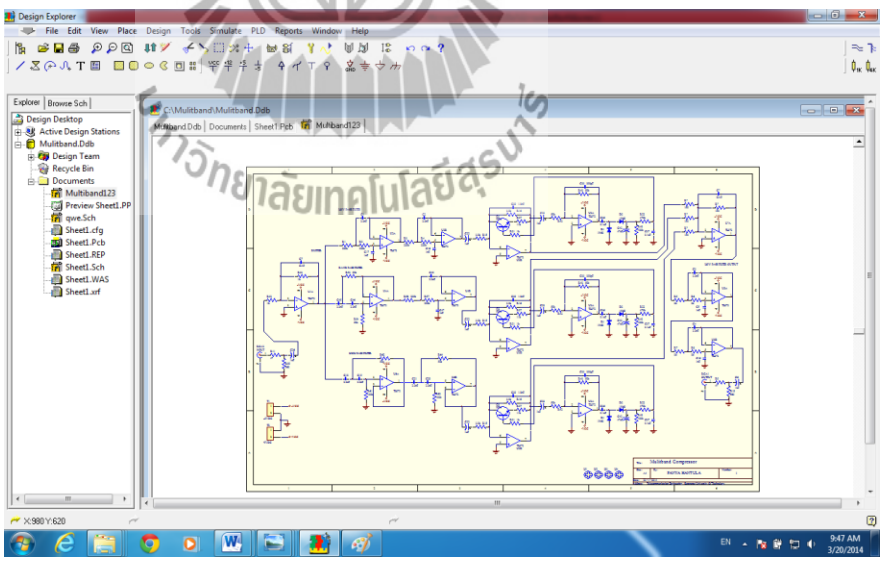
รูปที่ 24หน้าต่างของ File Compressor.PCB

2. ทำการ Add library โดยการคลิกที่ Design --> Add/Remove Library…. และเลือก File Library ที่ต้องการ แล้วคลิกที่ Add ===>คลิก OK



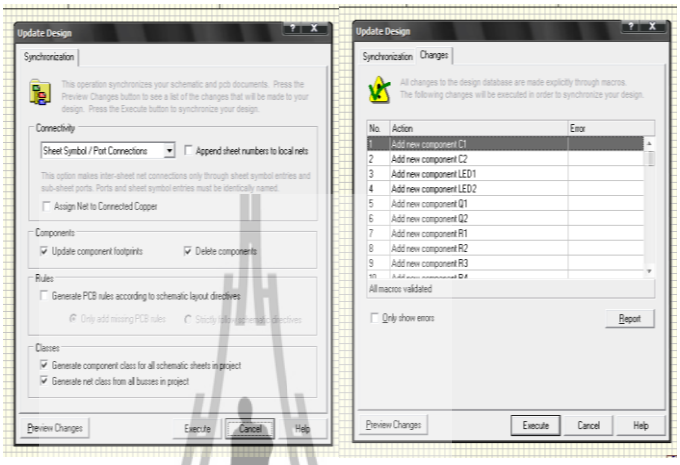
รูปที่ 25การ Add library

3.เมื่อทำการ Add Library เสร็จแล้ว ให้เปิดFile Schematic ขึ้นมา แล้วคลิกที่ Design --> Update PCB



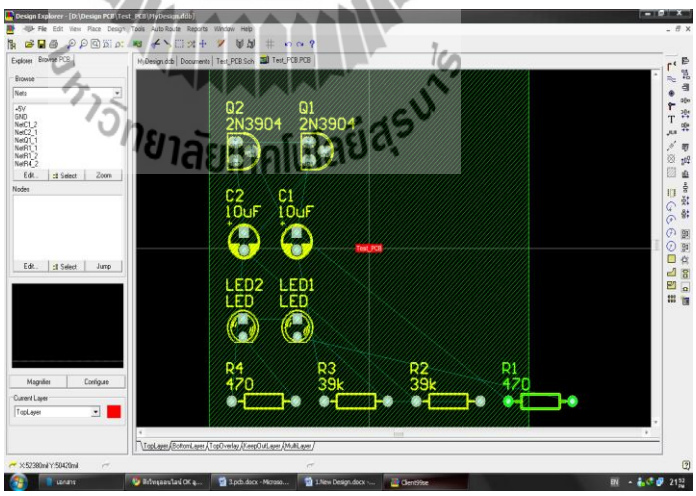
รูปที่ 26เปิดไฟล์ File Schematic ในไฟล์งานของ PCB

4.คลิกที่ Preview Changes (รูปด้านซ้ายมือ) เพื่อตรวจสอบความผิดพลาด หากตรวจสอบแล้วพบว่าในช่อง Error ไม่มีข้อความเตือน ให้คลิกที่ Executes แต่หากเกิดข้อผิดพลาดให้ทำการแก้ไขก่อน จนกว่าจะไม่เกิด Error



รูปที่ 27การตรวจสอบความผิดพลาด

5. เมื่อทำการกด Executes แล้วกลับมาที่ File Compressor.PCBอีกครั้ง (ถ้าหากไม่เห็นอุปกรณ์แสดงให้กด Key Z ตามด้วย Key A เพื่อให้แสดงอุปกรณ์)

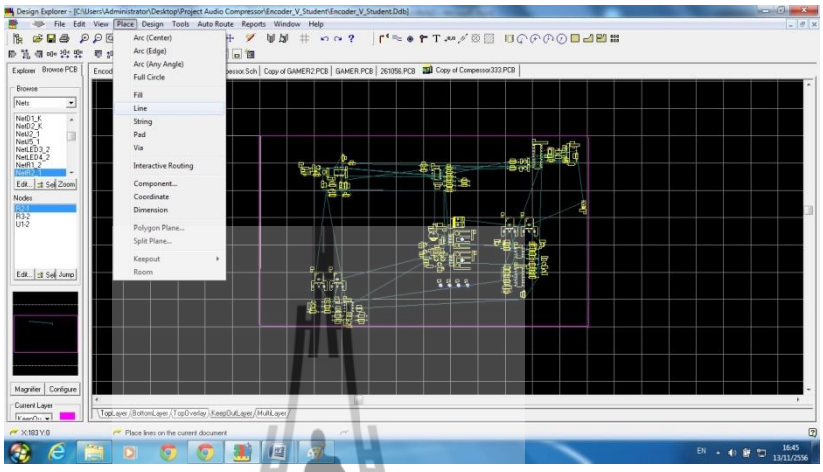


รูปที่ 28แสดงหน้าต่าง File Compressor.PCB

คลิกพื้นที่สีเขียวแล้วกด Key Delete เพื่อลบออก

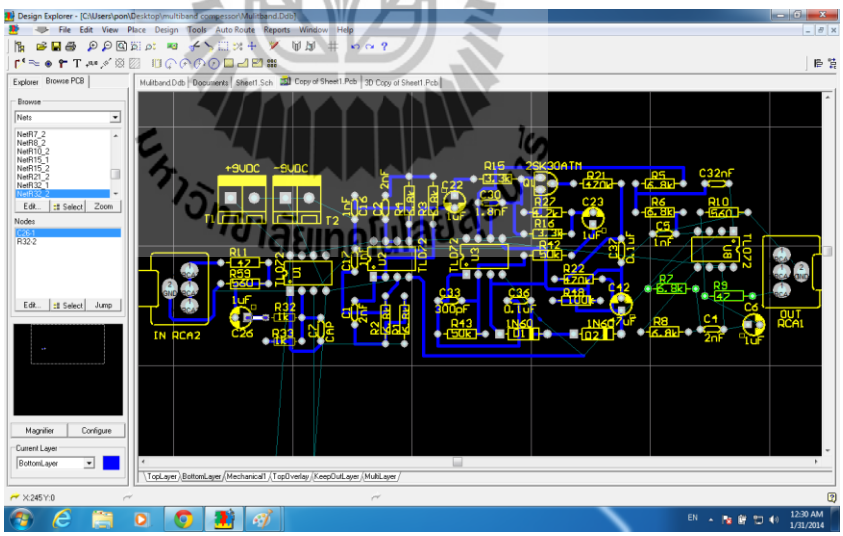
6. เลือกพื้นที่ขอบเขตของแผ่น PCB โดยคลิกที่KeepOutLayerด้านล่างแล้วคลิกที่คำสั่ง

Place --> Line แล้วเลือกพื้นที่ของ PCB



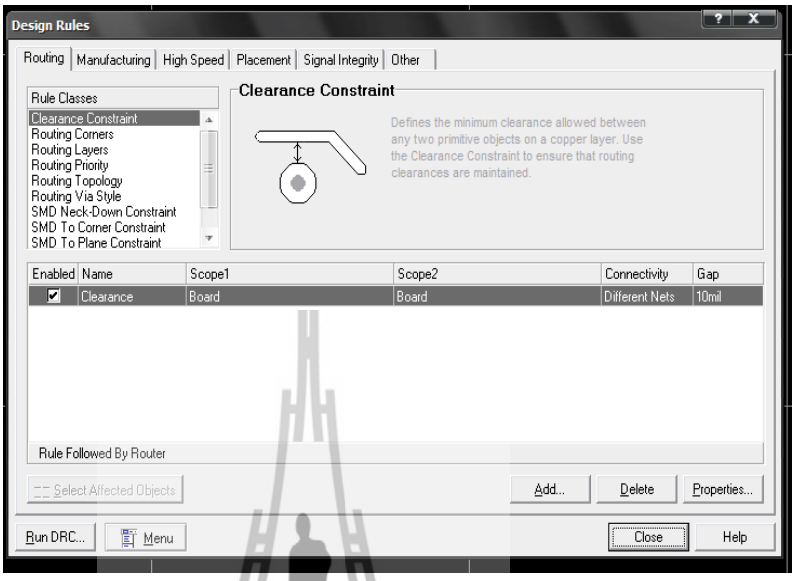
รูปที่ 29การเลือกพื้นที่ขอบเขตของแผ่น PCB

7. จัดวางอุปกรณ์ตามต้องการ



รูปที่ 30 Artworkของ PCB

8. ทำการกำหนดค่าต่าง ๆ โดยคลิกที่Design --> Rules จะได้หน้าต่างดังรูป



รูปที่ 31การกำหนดค่า เพื่อที่จะทำการ Rules

- **Clearance Rule**คือระยะทางของ Track กับ Padปรับค่า Minimum Clearance เป็น 20 mil
- **Routing Corners**คือลักษณะการเดินเส้นของ Track เมื่อเกิดจุดที่ต้องเลี้ยว
- **Routing Layers Rule**คือเลือก Layer ที่ต้องการ Rules เช่น หากเป็น PCB แบบ Single – Sided จะตั้งค่า Top Layer เป็น Not Used
- **Routing Topology** คือเทคนิคการ Rules
- **Width Constraint** คือกำหนดขนาดของเส้นที่ Rules

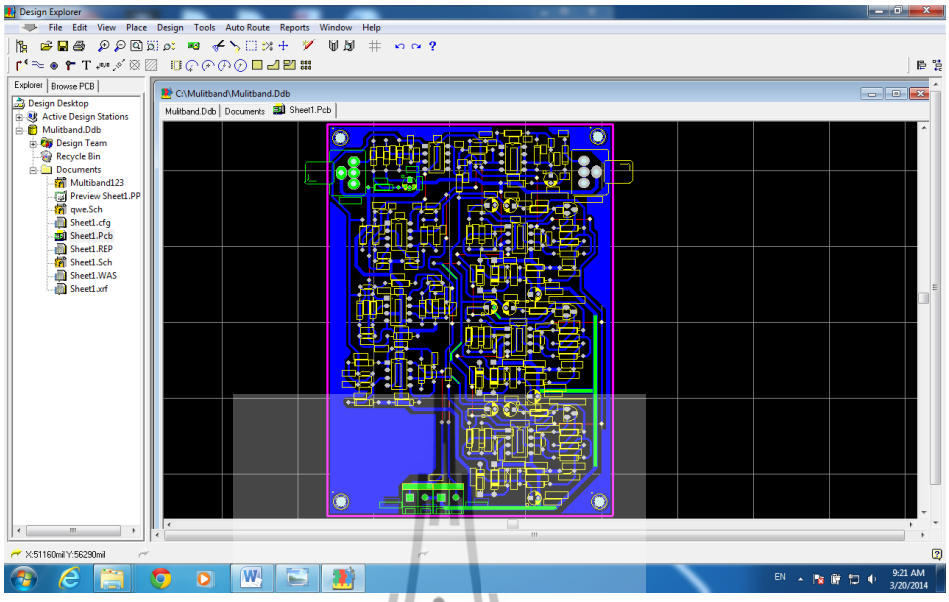
  Minimum Width คือขนาดของเส้นที่เล็กที่สุดที่สามารถ Rules ได้

  Maximum Width คือขนาดของเส้นที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถ Rules ได้

  Preferred Width คือขนาดของเส้นที่ Rules ใน PCB ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

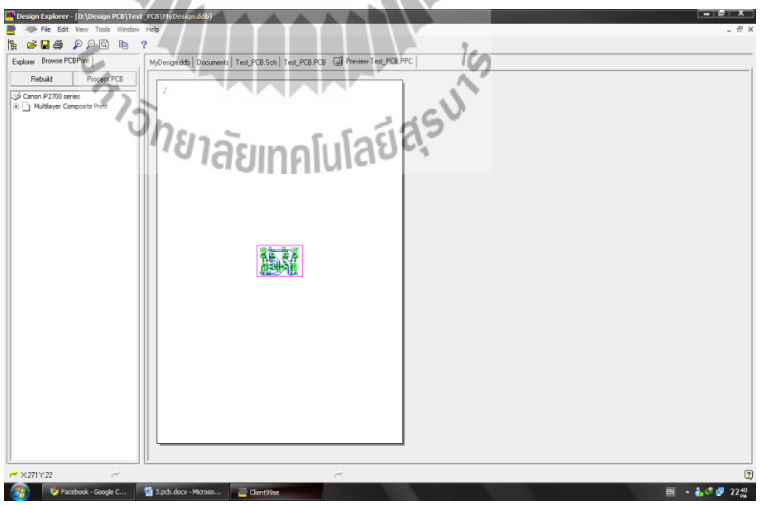
2. ทำการ เชื่อมต่ออุปกรณ์โดยใช้คำสั่งInteractively route connections

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่32เมื่อทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์

3. หลังจากที่ได้ Artwork ของ PCB แล้วต้องทำการพิมพ์เพื่อนำไปทำเป็นแผ่น PCB ต่อไป คลิกที่ File --> print/preview จะได้ดังรูป



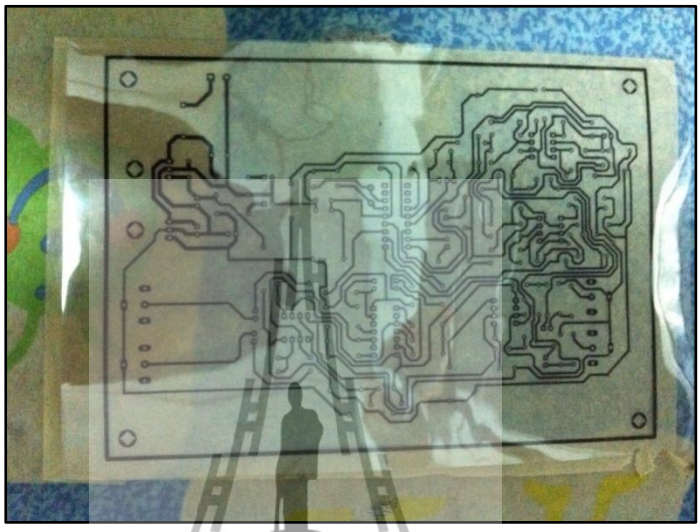
รูปที่ 33 Artwork ของ PCB เพื่อนำไปทำเป็นแผ่นPCB

เพียงเท่านี้เราก็สามารถที่จะสร้างแผ่น PCB ได้ด้วยตัวเอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

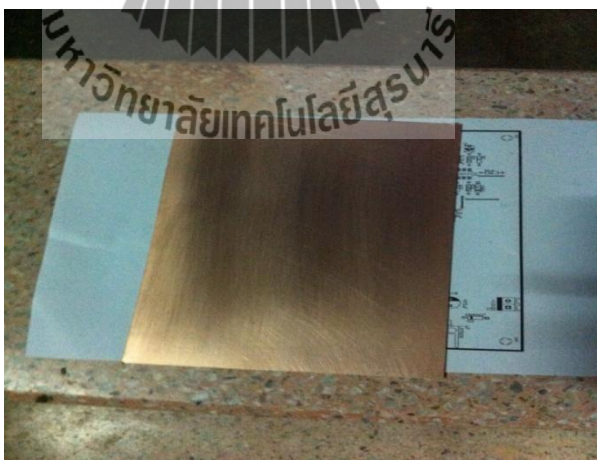
วิธีการทำแผ่น PCB

1. นำลายวงจรพิมพ์ลงบนกระดาษแล้วนำไปถ่ายเอกสาร ลงบนแผ่นใส



รูปที่ 34ลายวงจรในแผ่นใส

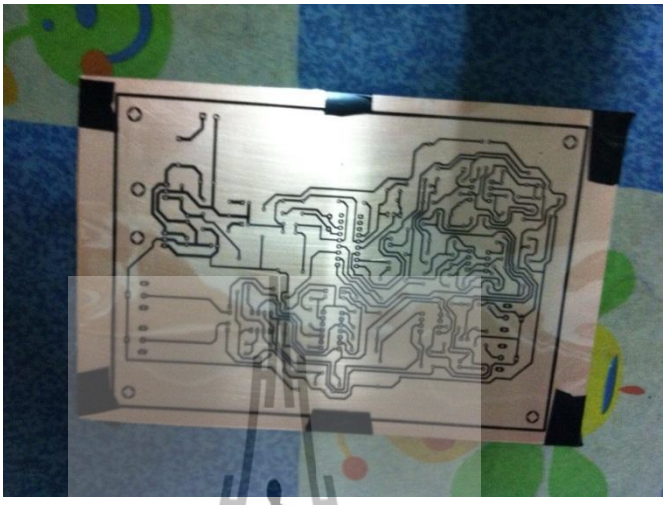
2. นำแผ่นใสที่เราถ่ายเอกสารมาแล้ว มาวัดขนาดกับแผ่นทองแดงและทำการตัดแผ่นทองแดง



รูปที่ 35 แผ่นทองแดงที่จะนำไปกัดปริ้น

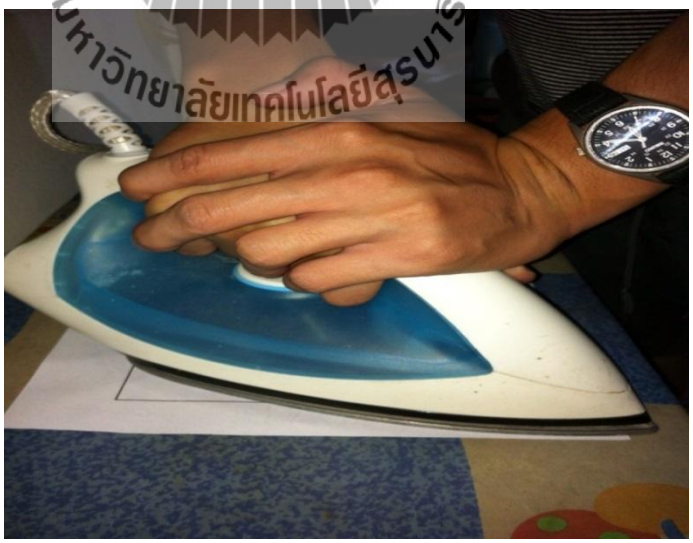
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3. นำแผ่นทองแดงที่ล้างแล้วมาติดแผ่นใส ติดให้เรียบที่สุด



รูปที่ 36 แผ่นทองแดงที่ล้างแล้วมาติดแผ่นใส

4. ใช้เตารีดรีดแผ่นทองแดงที่ติดแผ่นใสแล้ว ออกแรงกดเล็กน้อย แล้วรีดไปมาให้ทั่ว



รูปที่ 37 รีดแผ่นทองแดงที่ติดแผ่นใส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

5.ลอกแผ่นใสออกจะเห็นลายติดอยู่บนแผ่นทองแดง

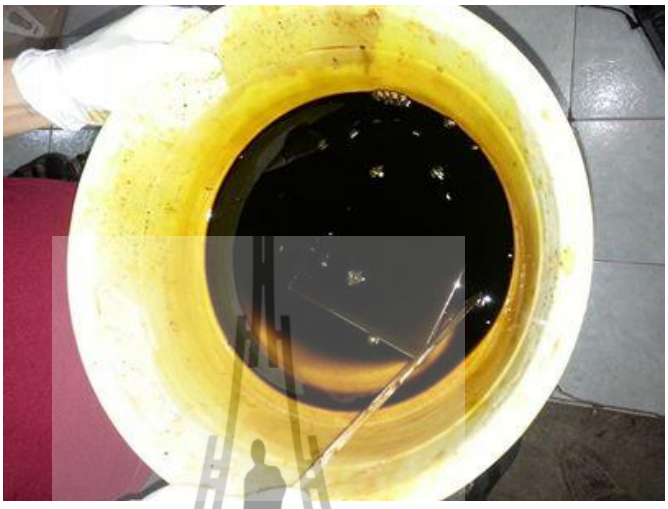
รูปที่ 38 ลอกแผ่นใสออกจากทองแดง

6. นำปากกาเขียนเติมส่วนที่ไม่ชัดหรือส่วนที่ขาด

รูปที่ 39 นำปากกาเขียนเติมลายวงจรส่วนที่ไม่ชัด

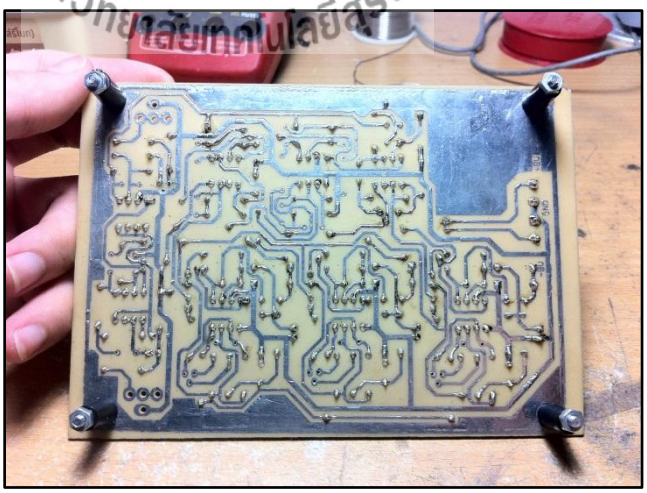
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7จากนั้นนำไปกัดด้วยน้ำยากัดปริ้น ผสมน้ำร้อนเล็กน้อย และเอาแผ่น PCB มาขัดด้วยทินเนอร์ เพื่อทำความสะอาด



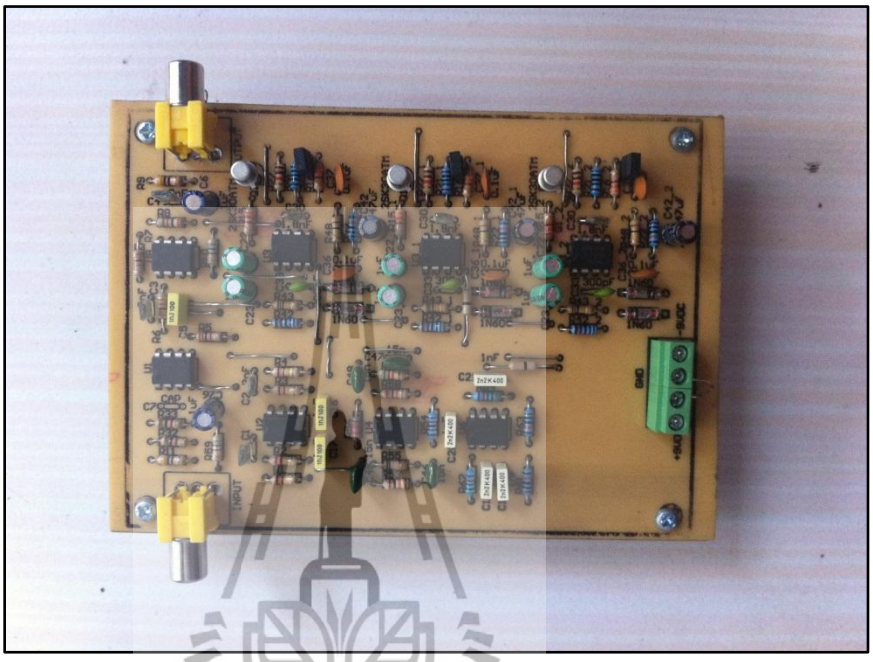
รูปที่ 40นำทองแดงกัดด้วยน้ำยากัดปริ้น

8.นำแผ่นPCBที่ได้ไปเจาะรูเพื่อวางชิ้นส่วนของวงจร แล้วนำไปขัดกรีให้เรียบร้อย



รูปที่ 41 นำแผ่น PCB ที่ได้ไปเจาะรูเพื่อวางชิ้นส่วนของวงจร

9แผ่นวงจรเมื่อประกอบเสร็จ



รูปที่ 42เมื่อประกอบวงจรเสร็จ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

[1] **ไอซีออปแอมป์ (Op-Amp LC)** จากเว็บไซต์ (14 กุมภาพันธ์ 2557)
http://www.sptc.ac.th/prapruet/devicesweb/books/book_10.htm

[2] **วงจรกรองความถี่เสียงต่ำ**(14 กุมภาพันธ์ 2557) จากเว็บไซต์
http://www.changpuak.ch/electronics/calc_08.php

[3] **วงจรกรองความถี่เสียงกลาง**(14 กุมภาพันธ์ 2557) จากเว็บไซต์
http://www.changpuak.ch/electronics/Sallen_Key_Bandpass_light.php

[4] **วงจรกรองความถี่เสียงสูง**(14 กุมภาพันธ์ 2557) จากเว็บไซต์
http://www.changpuak.ch/electronics/calc_09.php

[5] **ทรานซีสเตอร์**(14 กุมภาพันธ์ 2557) จากเว็บไซต์

http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%8B%E0%B8%B4%E0%B8%AA%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี