

# Perancangan *Crossover* Dua Jalur Pasif dan Aktif Orde Dua

**Budihardja Murtianta**

Program Studi Teknik Elektro,  
Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer,  
Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga  
budihardja@yahoo.com

## Abstrak

Sirkuit *crossover* pasif terdiri dari komponen pasif (induktor dan kapasitor) yang tidak mempunyai penguatan daya. Sirkuit *crossover* aktif terdiri dari komponen pasif (resistor dan kapasitor) serta komponen aktif (penguat operasi) yang mempunyai penguatan daya. Prinsip *crossover* ini memilah frekuensi audio menjadi dua rentang frekuensi yaitu rentang frekuensi rendah yang lewat tapis pelewat frekuensi rendah menuju *woofer* dan rentang frekuensi tinggi yang lewat tapis pelewat frekuensi tinggi menuju *tweeter*. Pada penelitian ini dirancang *crossover* dua jalur pasif dan aktif order dua berdasarkan teori-teori dan perhitungan-perhitungan elektronika. Rentang frekuensi rendah dan rentang frekuensi tinggi dipisah pada titik frekuensi persilangan 3 kHz. *Crossover* dirancang mempunyai tanggapan frekuensi datar. Nilai faktor kualitas  $Q$  tapis dipilih = 0,5 untuk mencapai tanggapan frekuensi datar. Pengukuran tanggapan frekuensi pada keluaran *crossover* adalah superposisi keluaran *woofer* dan *tweeter*. Hasil perancangan diukur dengan menggunakan *Circuit Maker*. Hasil simulasi menunjukkan tanggapan keluaran *woofer* dan *tweeter* adalah datar dengan pemisahan antara rentang frekuensi rendah dan rentang frekuensi tinggi pada frekuensi persilangan 3 kHz dan aras tegangan pada titik frekuensi kutub tapis turun menjadi setengahnya atau sebesar 6 dB. *Crossover* aktif diberi penguat operasi yang penguatan tegangannya diatur sebesar  $3\times$  dan hasil pengukuran menunjukkan tegangan keluarannya meningkat  $3\times$  dari keluaran *crossover* pasif.

**Kata kunci:** *crossover*, orde dua, tanggapan frekuensi

## Abstract

Passive crossover circuits consist of passive components (inductors and capacitors) that have no power gain. An active crossover circuit consists of passive components (resistors and capacitors) and active components (operation amplifiers) that yields power gain. In this study, a second-order passive and active two-way crossover was designed based on electronic theories and calculations. The principle of this crossover is to divide the audio frequency into two frequency ranges, namely the low frequency range that passes the low frequency filter to the woofer and the high frequency range which passes the high frequency filter to the tweeter. The low frequency range and the high frequency range are separated at a crossover frequency point of 3 kHz. Crossovers are designed to have a flat frequency response. The quality factor value of  $Q$  filter was chosen = 0.5 to achieve a flat frequency response. The measurement of the frequency response at the crossover output is the superposition of the woofer and tweeter outputs. The results of the design are measured using a Circuit Maker. The simulation results show that the output response of the woofer and tweeter is flat with a separation between the low frequency range and the high frequency range at a crossover frequency of 3 kHz and the voltage level at the filter pole

frequency point drops to half or 6 dB. The active crossover is given an operating amplifier whose voltage gain is set at 3x and the measurement results show that the output voltage increases 3x from the passive crossover output.

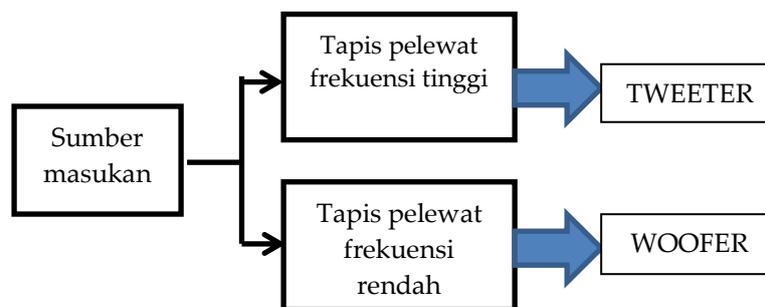
**Keywords:** crossover, second-order, frequency response

## 1. Pendahuluan

*Crossover* audio adalah jenis sirkuit tapis elektronik yang membagi sinyal audio menjadi dua atau lebih rentang frekuensi, sehingga sinyal dapat dikirim ke penyuar (*loudspeaker*) yang dirancang untuk beroperasi dalam rentang frekuensi yang berbeda. Tapis *crossover* dapat berupa pasif atau aktif dan sering digambarkan sebagai *dua jalur* atau *tiga jalur*, yang menunjukkan bahwa *crossover* membagi sinyal yang diberikan menjadi dua rentang frekuensi atau tiga rentang frekuensi.

*Tweeter* memiliki ukuran fisik yang kecil, dengan diameter kubah (*dome*) biasanya sekitar satu inci (2 atau 3 cm). Teknologi ini bekerja sangat baik untuk frekuensi tinggi, katakanlah di atas 1 kHz, tetapi sangat tidak memadai untuk reproduksi bass karena area sekecil itu tidak dapat memindahkan banyak udara untuk mereproduksi frekuensi bass. Unit penggerak frekuensi rendah harus memiliki diameter yang jauh lebih besar, hingga 12 inci untuk Hi-Fi domestik. Unit penggerak frekuensi rendah menggunakan *woofer*. Sebaliknya secara teknis tidak mungkin untuk membuat unit penggerak frekuensi rendah bekerja secara akurat hingga 20 kHz, karena ketika frekuensi meningkat, kerucut (*cone*) berhenti bergerak karena tidak tanggap terhadap frekuensi tinggi [1].

Sebenarnya tidak ada frekuensi *crossover* yang sempurna dan berfungsi untuk setiap penyuar. Hal ini tergantung pada banyak hal. Namun frekuensi persilangan paling umum yang bekerja dengan baik untuk *crossover* dua jalur adalah antara 3 kHz dan 3,5 kHz [2]. Bagan kotak sirkuit *crossover* dua jalur dan penyuar ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan kotak sirkuit *crossover* dua jalur dan penyuar

*Crossover* yang dirancang adalah *crossover* dua jalur pasif dan aktif orde dua yang mempunyai jangkauan frekuensi audio 20 Hz – 20 kHz dan frekuensi persilangannya 3 kHz. Sumber sinyal masukan sirkuit *crossover* akan dipilah berdasarkan frekuensinya oleh tapis pelewat frekuensi rendah dan tapis pelewat frekuensi tinggi. Sinyal dengan frekuensi 3 kHz ke bawah lewat pelewat frekuensi rendah menuju ke *woofer* dan sinyal dengan frekuensi atas 3 kHz ke atas lewat tapis pelewat frekuensi tinggi menuju ke *tweeter*.

## 2. Perancangan

Perancangan *crossover* dua jalur pasif dan aktif orde dua ini berdasarkan teori-teori dan perhitungan-perhitungan elektronika. Tahapan yang dilakukan meliputi penentuan bagan kotak sistem, penentuan sirkuit yang dibutuhkan, pengumpulan dasar teori dan formula untuk perancangan, penentuan komponen dan nilainya, melakukan pengukuran serta pengumpulan data untuk dianalisa.

*Crossover* pasif terdiri dari komponen-komponen pasif seperti resistor, kapasitor, dan induktor. *Crossover* pasif tidak mempunyai penguatan daya pada sinyal yang dilewatkannya, sedangkan *crossover* aktif terdiri dari komponen-komponen aktif yang mempunyai penguatan seperti transistor, penguat operasi, dan sebagainya, selain komponen-komponen pasif [3]. Resistor merupakan elemen pasif yang menghamburkan daya sebagai panas [4]. *Crossover* aktif yang dirancang memakai penguat operasi sebagai komponen aktifnya. *Crossover* dua jalur pasif dan aktif orde dua menggunakan metode penapisan frekuensi dengan tapis orde dua. Pada perancangan ini menggunakan tapis pelewat frekuensi rendah dan tapis pelewat frekuensi tinggi yang akan ditentukan faktor pemuncakan dan redaman pada titik frekuensi persilangan tapis dengan memilih nilai faktor redaman atau faktor kualitas tapis. Nilai-nilai komponen disesuaikan dengan spesifikasi *crossover* lewat perhitungan rumus-rumus acuan. Hasil rancangan sirkuit *crossover* akan diukur dengan simulator *Circuit Maker*.

### 2.1. Tapis Pelewat Frekuensi Rendah

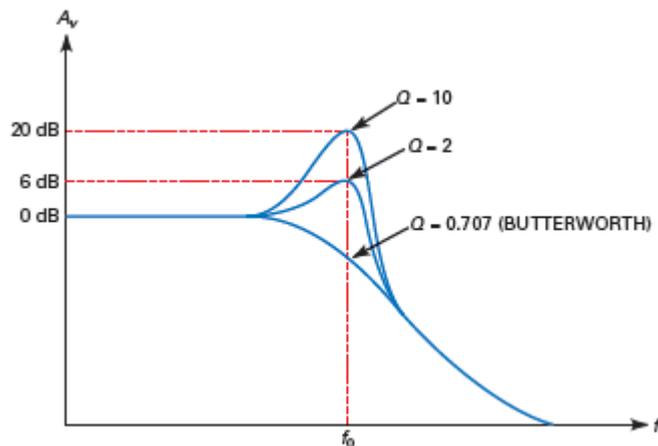
Pada tapis pelewat frekuensi rendah, frekuensi antara nol dan frekuensi penggal disebut *passband*. Frekuensi di atas frekuensi penggal disebut *stopband*. Daerah antara *passband* dan *stopband* disebut transisi (*roll-off*). Tapis pelewat frekuensi rendah yang ideal memiliki redaman nol di *passband*, redaman tak terbatas di *stopband*, dan transisi yang vertikal. Tapis pelewat frekuensi rendah yang tak ideal mentoleransi redaman maksimal 0,5 dB di *passband*, redaman minimal 60 dB di *stopband*, dan transisi yang mempunyai kemiringan sesuai jumlah orde tapis. Pada tapis orde dua pasif terdapat frekuensi resonansi  $f_o$  dan dapat terjadi pemuncakan atau redaman tergantung nilai faktor kualitasnya. Berikut hubungan frekuensi resonansi  $f_o$ , faktor redaman  $\alpha$ , dan faktor kualitas  $Q$  dari tapis [5].

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{2\pi f_L} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{Q} \quad (3)$$

Gambar 2 menunjukkan pengaruh faktor  $Q$  terhadap tanggapan frekuensi tapis orde dua.



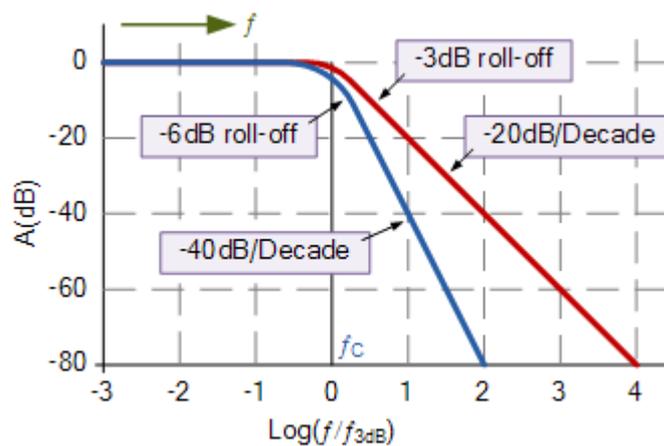
Gambar 2. Pengaruh Q terhadap tanggapan orde dua [5]

Transisi antara *passband* dan *stopband* mempunyai kemiringan sesuai jumlah orde tapis. Semakin banyak jumlah ordenya semakin curam transisinya.

$$\text{Transisi} = 20n \text{ dB/dekade} \quad (4)$$

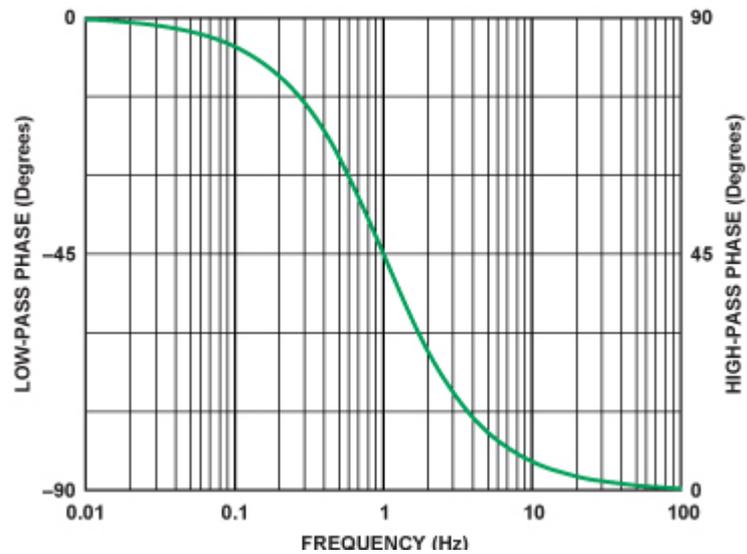
di mana  $n$  adalah jumlah orde.

Pengaruh jumlah orde tapis terhadap kemiringan transisi ditunjukkan pada Gambar 3. Garis merah menunjukkan  $n = 1$  dan garis biru menunjukkan  $n = 2$ .

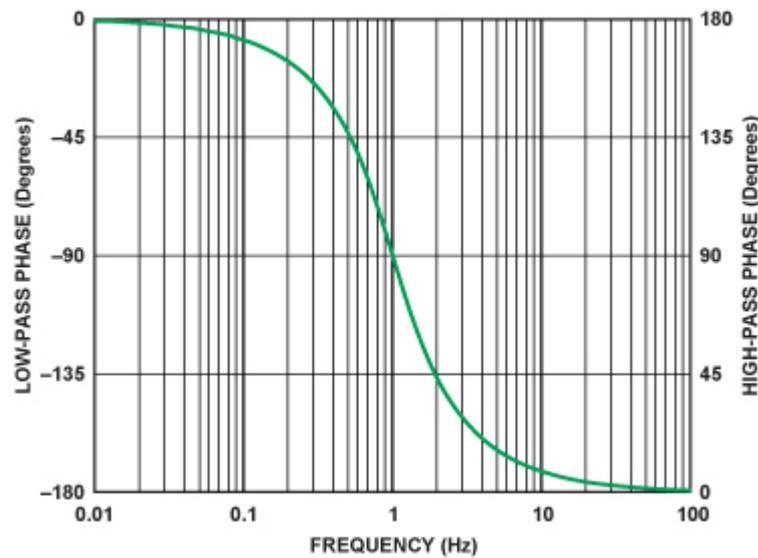


Gambar 3. Tanggapan frekuensi pelewat rendah yang dinormalisasi [6]

Jumlah orde tapis mempengaruhi pergeseran fase keluaran tapis. Semakin banyak jumlah orde tapis semakin besar pergeseran fasenya. Untuk orde 1 dapat terjadi pergeseran fase sebesar  $90^\circ$  dan untuk orde 2 dapat terjadi pergeseran fase sebesar  $180^\circ$ . Pergeseran fase terjadi baik pada tapis pelewat frekuensi rendah maupun pada tapis pelewat frekuensi tinggi. Pergeseran fase pada tapis pelewat frekuensi rendah adalah *lagging* dan pergeseran fase pada tapis pelewat frekuensi tinggi adalah *leading*. Tanggapan fase tapis pelewat frekuensi rendah dan tinggi orde 1 ditunjukkan pada Gambar 4 dan tanggapan fase tapis pelewat frekuensi rendah dan tinggi orde 2 ditampilkan pada Gambar 5.



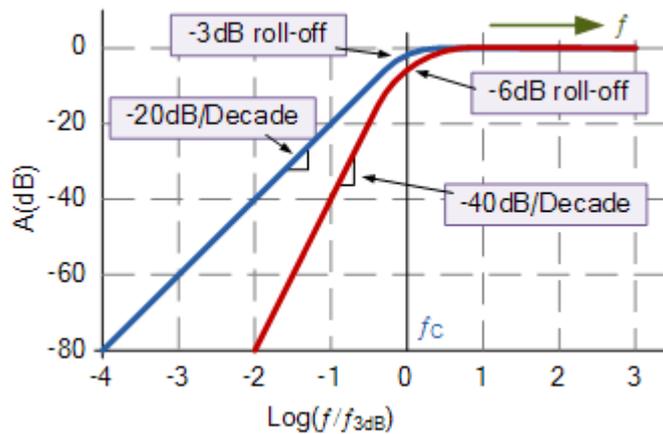
Gambar 4. Tanggapan fase tapis pelewat frekuensi rendah dan tinggi orde 1 [7]



Gambar 5. Tanggapan fase tapis pelewat frekuensi rendah dan tinggi orde 2 [7]

## 2.2. Tapis Pelewat Frekuensi Tinggi

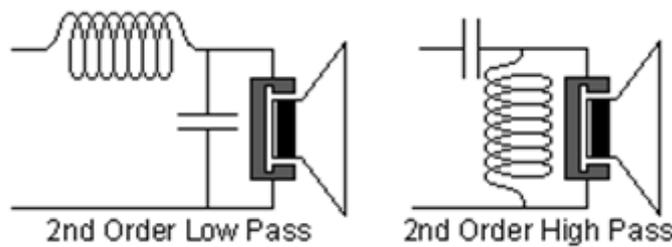
Pada tapis pelewat frekuensi tinggi, frekuensi antara nol dan frekuensi penggal disebut *stopband*. Frekuensi di atas frekuensi penggal disebut *passband*. Daerah antara *stopband* dan *passband* disebut transisi (*roll-off*). Tapis pelewat frekuensi tinggi yang ideal memiliki redaman nol di *passband*, redaman tak terbatas di *stopband*, dan transisi yang vertikal. Tapis pelewat frekuensi tinggi yang tak ideal menoleransi redaman maksimal 0,5 dB di *passband*, redaman minimal 60 dB di *stopband*, dan transisi yang mempunyai kemiringan sesuai jumlah orde tapis. Tanggapan tapis pelewat frekuensi tinggi ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tanggapan frekuensi pelewat rendah yang dinormalisasi [6]

### 2.3 Tapis Orde Dua dengan Penyuar

Pada Gambar 7 dapat dilihat komponen induktor dan kapasitor yang dibentuk sebagai tapis pelewat frekuensi rendah dan tapis pelewat frekuensi tinggi orde dua dan dihubungkan dengan beban penyuar. Penyuar pada pelewat frekuensi rendah disebut *woofer* dan penyuar pada pelewat frekuensi tinggi disebut *tweeter*.



Gambar 7. Tapis orde dua dengan penyuar [8]

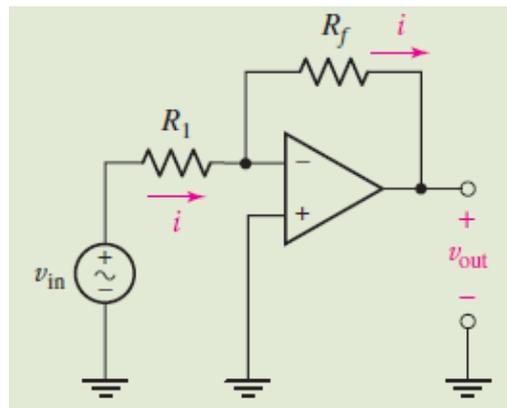
### 2.4 Penguat Operasi

Penguat operasi dipergunakan untuk merealisasi *crossover* aktif. Penguat operasi mempunyai dua masukan, yaitu masukan membalik dan masukan tak membalik sehingga penguat ini dapat dioperasikan sebagai penguat membalik atau sebagai penguat tak membalik.

#### 2.4.1 Penguat Membalik

Sirkuit penguat membalik pada Gambar 8 di mana sinyal masukan dihubungkan pada masukan membalik (-) dan mempunyai penguatan tegangan  $A_v$  sebagai berikut [9]:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (5)$$



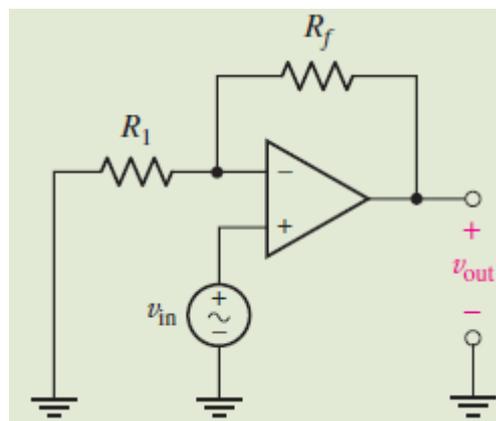
Gambar 8. Penguat membalik [9]

Keluaran penguat membalik berlawanan fase dengan masukannya. Jadi beda fase antara sinyal keluaran dan masukan penguat membalik adalah  $180^\circ$ . Impedansi masukan penguat membalik tidak besar sekali seperti masukan tak membalik dan besarnya sama dengan  $R_1$ .

#### 2.4.2 Penguat Tak Membalik

Sirkuit penguat tak membalik terlihat pada Gambar 9 dimana sinyal masukan dihubungkan pada masukan tak membalik (+) dan mempunyai penguatan tegangan  $A_v$  sebagai berikut [9]:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_f}{R_1} + 1 \quad [6]$$



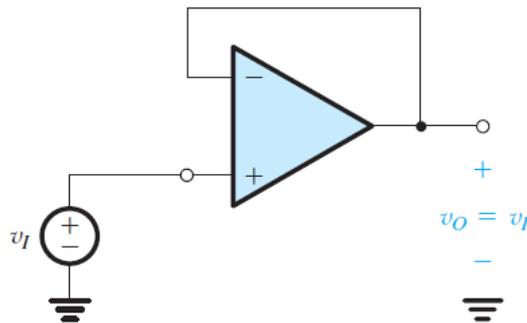
Gambar 9. Penguat membalik [9]

Keluaran penguat tak membalik sefase dengan masukannya. Jadi beda fase antara sinyal keluaran dan masukan penguat membalik adalah  $0^\circ$ . Impedansi masukan penguat tak membalik adalah besar dan idealnya tak berhingga.

#### 2.4.3 Sirkuit Penyangga/Buffer

Impedansi masukan tinggi adalah fitur yang sangat diinginkan dari penguat tak membalik [10]. Hal ini memungkinkan penggunaan sirkuit sebagai penguat penyangga

(*buffer*) untuk menghubungkan sumber sinyal dengan impedansi tinggi ke beban dengan impedansi rendah. Penguat penyangga tidak diperlukan untuk memberikan penguatan tegangan, tetapi digunakan sebagai penyepadan impedansi atau penguat daya. Dalam beberapa kasus dapat dibuat  $R_f = 0$  dan  $R_1 = \infty$  untuk mendapatkan penguatan tegangan penguat tak membalik  $A_v = 1$  (*unity gain*) yang ditunjukkan pada Gambar 10. Sirkuit ini disebut sebagai pengikut tegangan, karena keluarannya mengikuti masukannya. Dalam keadaan ideal, penguatan tegangan tak berhingga dari penguat operasi membuat  $V_o = V_i$ ,  $R_{in} = \infty$ ,  $R_{out} = 0$ . Pada sirkuit penyangga seluruh keluaran diumpankan kembali ke masukan membalik.



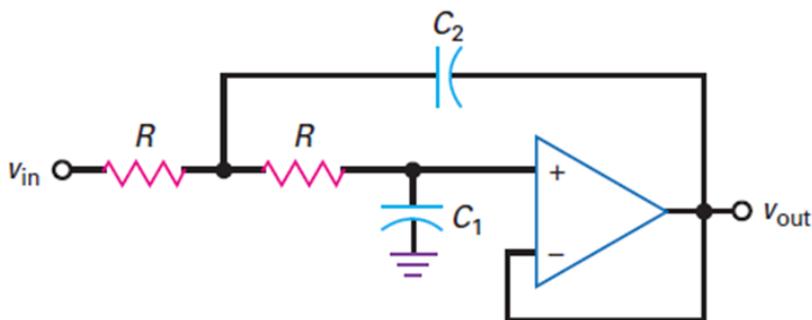
Gambar 10. Sirkuit penyangga/*buffer*

### 2.2.3 Penguat Operasi sebagai Tapis Pelewat Frekuensi Rendah Orde Dua

Tapis pelewat frekuensi rendah orde dua dengan penguat operasi dapat dilihat pada Gambar 11. Nilai  $Q$  dan frekuensi kutub  $f_p$  tapis pelewat frekuensi rendah orde dua menggunakan penguat operasi dengan penguatan tegangan  $A_v = 1$  diperoleh dari rumus sebagai berikut [5]:

$$Q = 0,5 \sqrt{C_2 / C_1} \quad (7)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi R \sqrt{C_1 C_2}} \quad (8)$$



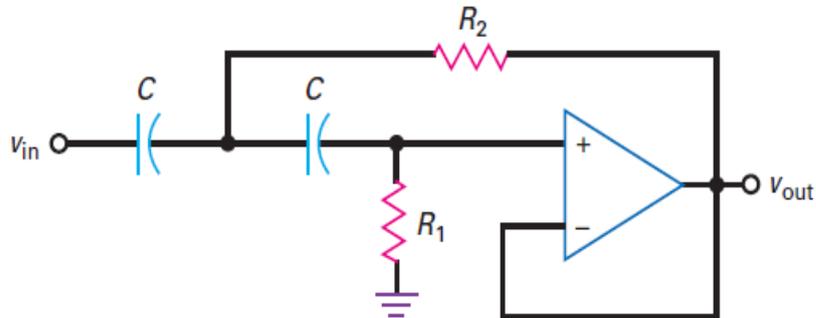
Gambar 11. Tapis pelewat frekuensi rendah orde dua dengan penguat operasi

### 2.2.4 Penguat Operasi sebagai Tapis Pelewat Frekuensi Tinggi Orde Dua

Tapis pelewat frekuensi tinggi orde dua dengan penguat operasi dapat dilihat pada Gambar 12. Nilai  $Q$  dan  $f_p$  tapis pelewat frekuensi tinggi orde dua menggunakan penguat operasi dengan penguatan tegangan  $A_v = 1$ , diperoleh dari rumus sebagai berikut [5]:

$$Q = 0,5\sqrt{R_2/R_1} \quad (9)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi R\sqrt{R_1R_2}} \quad (10)$$



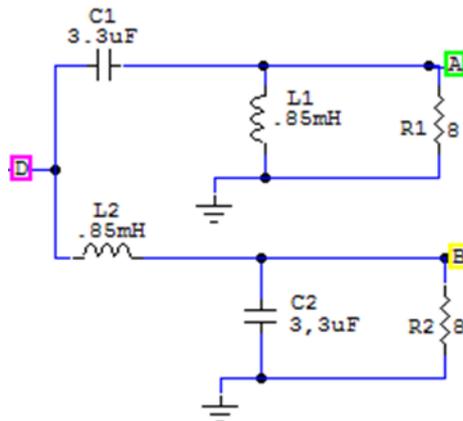
Gambar 12. Tapis pelewat frekuensi tinggi orde dua dengan penguat operasi

### 3. Perhitungan Nilai Komponen

Realisasi sirkuit *crossover* dua jalur pasif dan aktif orde dua menggunakan komponen - komponen yang nilainya diperoleh berdasarkan perhitungan menggunakan Persamaan (1)-(10).

#### 3.1 Crossover Dua Jalur Pasif Orde Dua

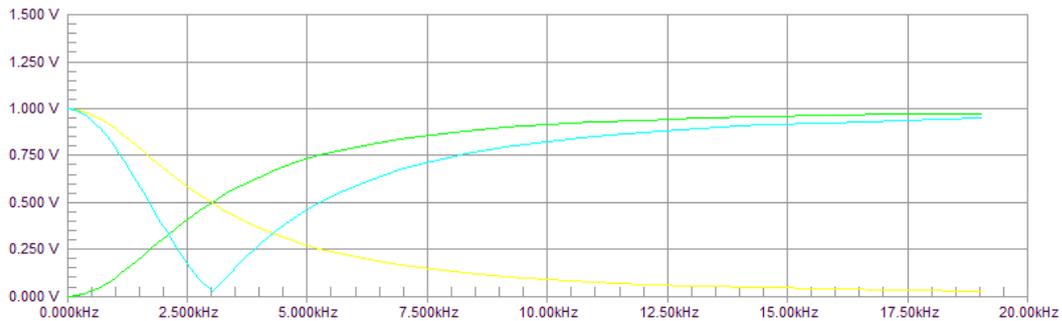
Untuk memperoleh tanggapan frekuensi tapis yang datar maka nilai faktor redaman  $\alpha$  pada titik frekuensi persilangan ditetapkan sebesar 6 dB atau  $\alpha = 2$ . Berdasarkan (3) diperoleh nilai  $Q = 0,5$ . Dengan menetapkan nilai  $R$  beban =  $8 \Omega$  dan frekuensi resonansi persilangan  $f_0 = 3$  kHz, maka dengan (1) dan (2) diperoleh nilai induktor  $L = 0,85$  H dan nilai kapasitor  $C = 3,3$  uF.



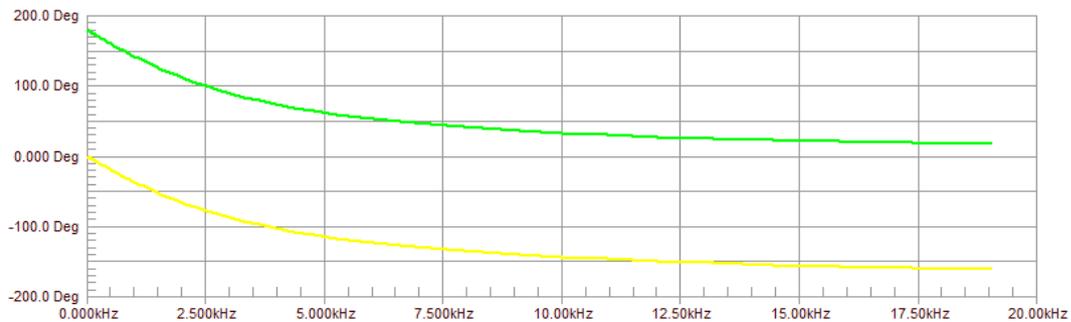
Gambar 13. Crossover dua jalur pasif orde dua

Sirkuit *crossover* dua jalur pasif orde dua ditunjukkan pada Gambar 13 dengan masukan pada terminal D (warna ungu) dan keluaran tapis pelewat frekuensi rendah pada terminal B (warna kuning) menuju *woofer* serta keluaran tapis pelewat frekuensi tinggi pada terminal A (warna hijau) menuju *tweeter*. Hasil pengukuran tanggapan frekuensi *crossover* pada Gambar 14 menunjukkan titik frekuensi persilangan tapis pelewat frekuensi rendah (warna kuning) dan tapis pelewat frekuensi tinggi (warna hijau) pada frekuensi 3 kHz dan turun menjadi setengahnya atau turun 6 dB. Hasil

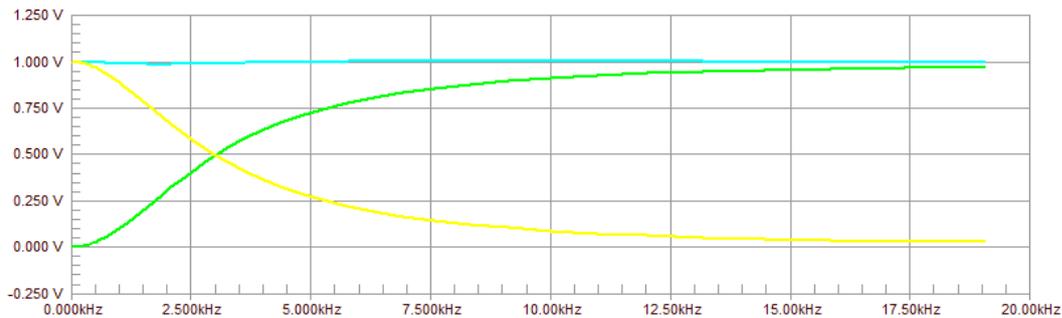
superposisi *woofer* pada keluaran tapis pelewat frekuensi rendah dan *tweeter* keluaran tapis pelewat frekuensi tinggi di udara ditunjukkan oleh garis warna biru di mana pada titik persilangan merupakan titik dengan aras terendah. Hal ini disebabkan kedua keluaran tersebut saling berlawanan fase (beda fase =  $180^\circ$ ). Hal ini dapat dijelaskan dengan pengukuran tanggapan fase masukan sirkuit pada Gambar 15 yang menunjukkan keluaran tapis pelewat frekuensi rendah (warna kuning) dan keluaran tapis pelewat frekuensi tinggi (warna hijau) saling berlawanan fase (beda fase =  $180^\circ$ ). Hal ini yang menyebabkan superposisi kedua keluaran saling mengurangi dan tanggapan frekuensi *crossover* tidak datar (*flat*). Untuk memperoleh tanggapan datar (*flat*) kedua keluaran tapis *crossover* harus mempunyai fase yang sama (beda fase =  $0^\circ$ ). Hal tersebut dapat dilakukan dengan memasang *tweeter* dengan membalik polaritasnya. Hasil pengukuran tanggapan frekuensi *crossover* ditunjukkan pada Gambar 16. Hasil superposisi keluaran *woofer* pada tapis pelewat frekuensi rendah dan keluaran *tweeter* tapis pelewat frekuensi tinggi di udara dengan polaritas *tweeter* dibalik ditunjukkan oleh garis warna biru yang berupa garis datar.



Gambar 14. Tanggapan frekuensi *crossover*



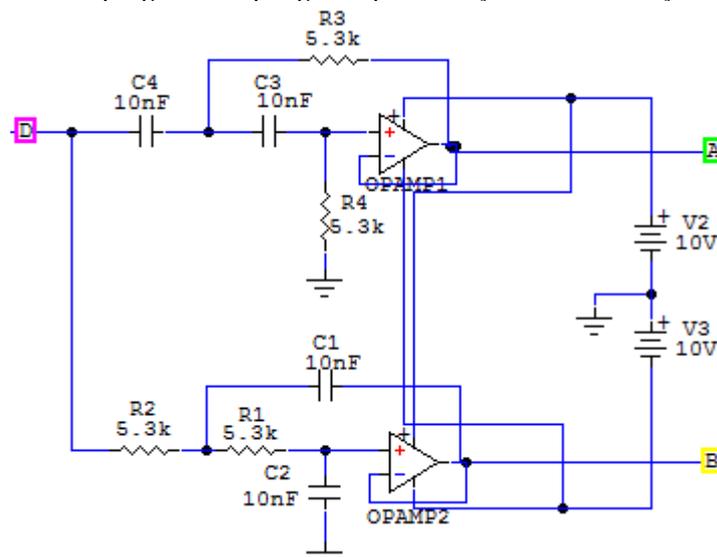
Gambar 15. Tanggapan fase *crossover*



Gambar 16. Tanggapan frekuensi *crossover* (polaritas *tweeter* dibalik)

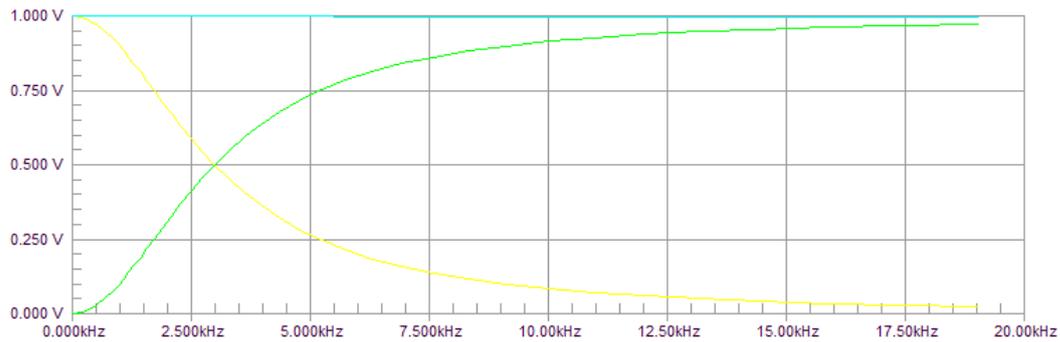
### 3.2 Crossover Dua Jalur Aktif Orde Dua

Rangkaian yang dipergunakan dapat dilihat pada Gambar 17. Untuk memperoleh tanggapan frekuensi tapis yang datar maka untuk tapis pelewat frekuensi rendah dipilih nilai faktor  $Q = 0,5$ . Berdasarkan persamaan (7) diperoleh nilai  $C_1 = C_2$  dan ditetapkan nilai  $C_1 = C_2 = C = 10 \text{ nF}$ . Dengan frekuensi kutub persilangan  $f_p = 3 \text{ kHz}$ , maka dengan persamaan (8) diperoleh nilai resistor  $R = 5,3 \text{ K}$ . Dengan demikian diperoleh nilai  $R_1 = R_2 = R = 5,3 \text{ k}\Omega$ . Bagi tapis pelewat frekuensi tinggi dipilih nilai faktor  $Q = 0,5$ . Berdasarkan persamaan (9) diperoleh nilai  $R_1 = R_2$ , sehingga nilai  $R_3 = R_4 = R = 5,3 \text{ k}\Omega$ . Dengan frekuensi kutub persilangan  $f_p = 3 \text{ kHz}$ , maka dengan (10) diperoleh nilai kapasitor  $C = 10 \text{ nF}$ . Dengan demikian diperoleh nilai  $C_3 = C_4 = C = 10 \text{ nF}$ . Untuk penguat operasi dipergunakan sesuai dengan bebannya. Jika beban berupa *woofer* atau *tweeter* maka dipergunakan penguat operasi daya besar, misalnya TDA2050. Jika beban berupa penguat daya maka dipergunakan penguat operasi daya kecil, misalnya LM741.



Gambar 17. Crossover dua jalur aktif orde dua

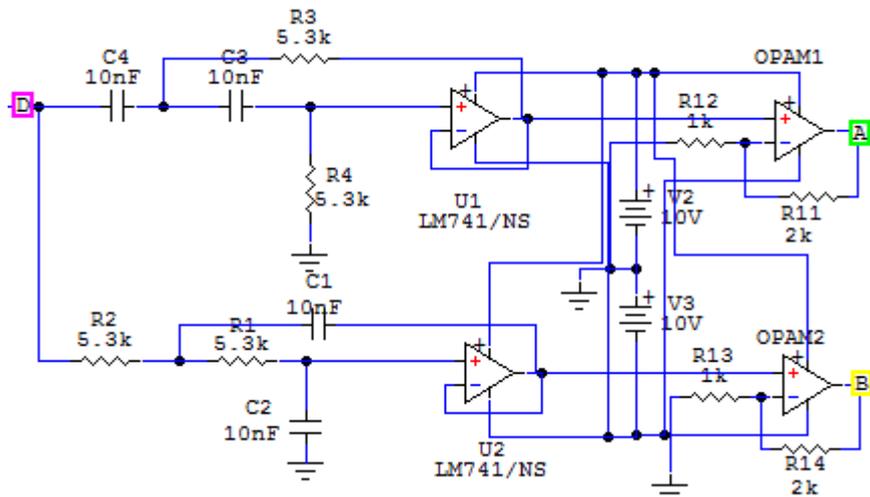
Seperti halnya pada *crossover* pasif, beda fase keluaran tapis pelewat frekuensi rendah dan keluaran tapis pelewat frekuensi tinggi adalah  $180^\circ$ . Agar diperoleh tanggapan frekuensi *crossover* datar (*flat*) maka polaritas *tweeter* dipasang terbalik dan hasil pengukuran tanggapan frekuensi *crossover* ditunjukkan pada Gambar 18. Pada Gambar 18 terlihat titik frekuensi kutub persilangan tapis pelewat frekuensi rendah (warna kuning) dan tapis pelewat frekuensi tinggi (warna hijau) pada frekuensi 3 kHz dan turun menjadi setengahnya atau turun 6 dB. Hasil superposisi suara *woofer* pada keluaran tapis pelewat frekuensi rendah dan suara *tweeter* pada keluaran tapis pelewat frekuensi tinggi *crossover* aktif di udara dengan polaritas *tweeter* dibalik ditunjukkan oleh garis warna biru yang berupa garis datar.



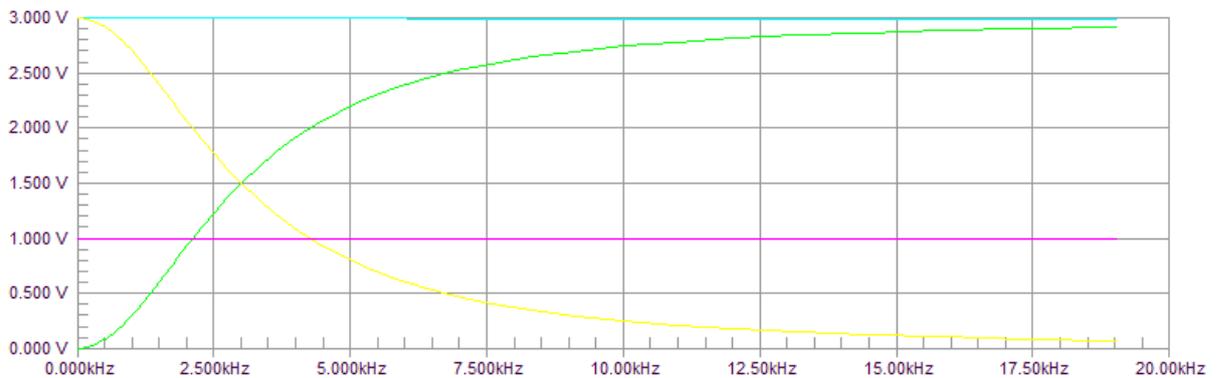
Gambar 18. Tanggapan frekuensi *crossover* aktif (polaritas *tweeter* dibalik)

### 3.3 *Crossover* dengan Faktor Penguatan

*Crossover* dengan faktor penguatan ditunjukkan pada Gambar 19. Sesuai (6) dengan memilih  $R_{11} = R_{14} = 2 \text{ k}\Omega$  dan  $R_{12} = R_{13} = 1 \text{ k}\Omega$ , maka diperoleh penguatan *crossover*  $A_v = 3\times$ . Hal tersebut dapat dilihat pada tanggapan frekuensi *crossover* yang ditunjukkan di Gambar 20 dengan masukan *crossover* = 1 V (warna nila) diperoleh keluaran *crossover* = 3 V (warna biru).



Gambar 19. *Crossover* dengan faktor penguatan



Gambar 20. Tanggapan frekuensi *crossover* dengan faktor penguatan

#### 4. Kesimpulan

*Crossover* aktif mempunyai penguatan yang dapat diatur. Tanggapan frekuensi *crossover* merupakan hasil superposisi tanggapan frekuensi tapis pelewat frekuensi rendah dan tanggapan frekuensi tapis pelewat frekuensi tinggi. Untuk memperoleh tanggapan frekuensi *crossover* yang datar harus ditetapkan nilai  $Q = 0,5$  dan polaritas *tweeter* dibalik. Hasil pengukuran sesuai dengan perhitungan, yang menunjukkan tanggapan keluaran *woofer* dan *tweeter* adalah datar dengan pemisahan antara rentang frekuensi rendah dan rentang frekuensi tinggi pada frekuensi persilangan 3 kHz dan aras tegangannya turun menjadi setengahnya atau sebesar 6 dB. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan untuk *crossover* tiga jalur dengan orde tiga atau lebih.

#### Daftar Pustaka

- [1] D. Self, "The Design of Active Crossovers," Routledge 711 Third Avenue, New York, 2nd edition, 2018.
- [2] Sound Certified [Online], <https://soundcertified.com/what-does-crossover-do-what-is-crossover-frequency-how-crossovers-work/>, diakses pada 22 Februari 2022.
- [3] C. K. Alexander, M. N. O. Sadiku, "Fundamentals of Electric Circuits," McGraw-Hill Companies, Inc., 5th edition, h. 15, 2013.
- [4] J. A. Svoboda, R. C. Dorf, "Introduction to Electric Circuits," John Wiley & Sons, Inc., 9th edition, h. 24, 2014.
- [5] A. Malvino, D. J. Bates, "Electronic Principles," McGraw-Hill Education, 8th edition, h. 806-827, 2016.
- [6] Electronics Tutorials [Online], <https://www.electronics-tutorials.ws/filter/second-order-filters.html>, diakses pada 2 Maret 2022.
- [7] H. Zumbahlen, "Phase Relations in Active Filters," [Online] <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/phase-response-in-active-filters-2.html>, diakses pada 5 Maret 2022.
- [8] M. Lawrence, "The Crossover Design Cookbook," Chapter 1: Simple Crossovers [Online], <https://www.calsci.com/audio/X-Overs1b.html>, diakses pada 5 Maret 2022.
- [9] W. H. Hayt, Jr., J. E. Kemmerly, S. M. Durbin, "Engineering Circuit Analysis," McGraw-Hill Companies, Inc., 8th edition, h. 182, 2012.
- [10] A. S. Sedra, K. C. Smith, "Microelectronic Circuits," Oxford University Press, 7th edition, h. 76, 2015.

