

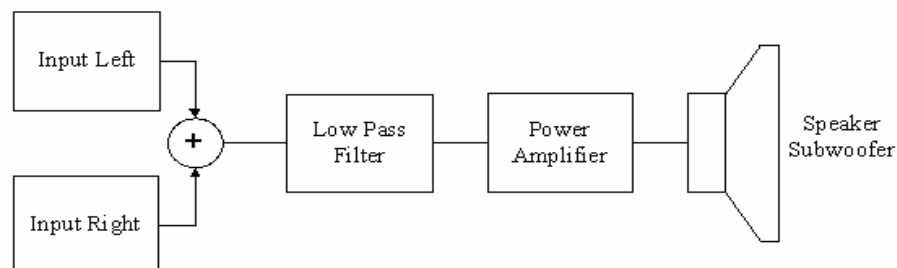
2. TEORI DASAR

Desain *subwoofer* dengan kotak termampatkan terdapat 2 macam yaitu kotak rapat (*sealed box*), dan *double cavity*, sedangkan *subwoofer* dengan kotak tak termampatkan dikenal dengan kotak *bass reflektif* (*vented box*).

Sistem *subwoofer* ini mempunyai beberapa bagian utama yang sangat penting, bagian-bagian itu antara lain:

- *Active Low Pass Filter*
- *Power Amplifier*
- *Speaker subwoofer*
- Kotak speaker (*speaker box*)

Blok diagram dari sistem *subwoofer* dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Blok Diagram Sistem *Subwoofer*

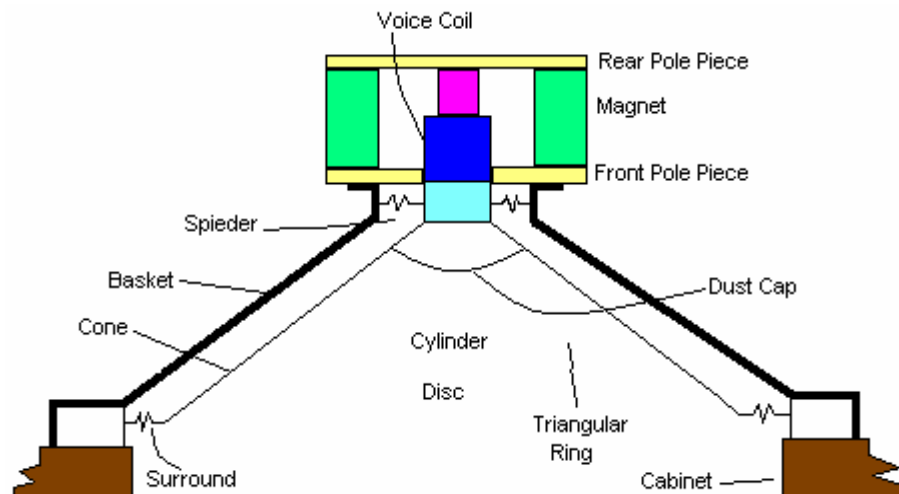
Setiap bagian dari sistem *subwoofer* ini mempunyai pengaruh yang besar terhadap penguatan sinyal yang masuk. Jika dari keseluruhan sistem *subwoofer* saling mendukung, maka terjadi pemindahan daya maksimal. Jika terdapat salah satu bagian yang kurang mendukung, maka hal itu akan mengakibatkan pemindahan daya tidak dapat maksimal.

Untuk mendesain sistem *subwoofer* harus memperhatikan kemampuan dari *speaker subwoofer* yang akan digunakan, karena hal itu berhubungan dengan penguatan sinyal yang masuk dari *power amplifier* yang akan digunakan juga. Penguatan dari *power amplifier* juga perlu diperhatikan. Apabila *output* yang

dihasilkan dari penguatan *power amplifier* terlalu besar, maka *speaker subwoofer* bekerja lebih tinggi dari kemampuan spesifikasinya dan dapat mengakibatkan kerusakan dari *speaker* tersebut. Sedangkan apabila *output* dari penguatan *power amplifier* terlalu kecil, maka hasil suara yang keluar tidak seperti yang diinginkan. Jika ingin membuat sistem *subwoofer* yang baik, yaitu antara *output power amplifier* dan *speaker subwoofer* harus sesuai, sehingga sistem *subwoofer* dapat bekerja dengan baik.

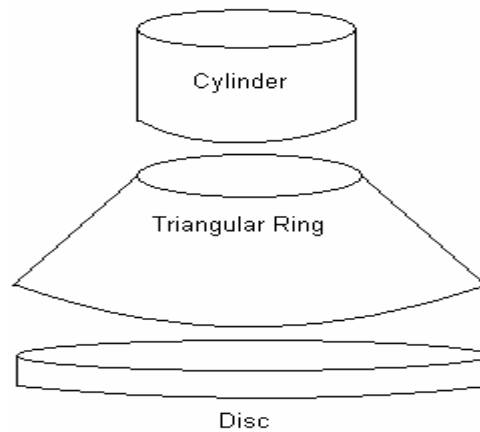
2.1. *Speaker*

Dalam komponen *speaker (loudspeaker)* secara umum berfungsi untuk menghasilkan frekuensi *output* sinyal *audio* yang diberikan dan dapat ditangkap oleh telinga manusia. Berikut penjelasan mengenai komponen penyusun *speaker* yaitu, *basket/frame*, *washer*, *yoke*, *magnet*, *voice coil*, *spieder/damper*, *cone paper*, *lead wire*, *eyelet*, *dust cap*, *terminal*, dan *gasket*. Gambar komponen penyusun dari *speaker* dapat dilihat pada gambar 2.2. dan gambar 2.3.



Gambar 2.2. Komponen Penyusun *Speaker*

Sumber: <http://www.info@incaradvice.com>



Gambar 2.3. Bentuk Bagan Umum dari *Speaker*

Sumber: <http://www.info@incaradvice.com>

2.1.1. *Basket / Frame*

Basket atau *frame* terbuat dari plat logam yang dapat menyangga seluruh bagian *speaker* dimana bagian-bagian *speaker* yang lain dapat dilekatkan hingga menjadi suatu *speaker* yang utuh

2.1.2. *Washer*

Bagian ini digunakan untuk memusatkan dan membentuk fluk magnetik dimana fungsinya merupakan salah satu kutub magnetik (berpasangan dengan *yoke* sebagai sisi kutub yang lain). Bagian ini secara langsung direkatkan pada *frame* dengan lem.

2.1.3. *Yoke*

Bagian ini juga berguna untuk memusatkan fluks magnetik dan berpasangan dengan *washer* dimana penguatan dan pemusatan kutub-kutub magnetik dibangkitkan oleh magnet permanen yang ditempatkan diantara keduanya.

2.1.4. Magnet

Magnet disini digunakan untuk membangkitkan medan magnet permanen yang akan digunakan untuk menggerakkan *voice coil*, sehingga dapat menghasilkan suara. Ada berbagai macam bahan magnet yang dapat dipergunakan pada pembuatan *loudspeaker* antara lain:

- *Ferrit*
- *Barium*
- *Strontium*
- *Alinco*
- *Sidu / Neodium*

Perbedaan bahan yang dipergunakan menyebabkan perbedaan pula pada medan magnet yang ditimbulkan. Kualitas medan yang terendah dihasilkan oleh *ferrit*, namun harga *ferrit* juga lebih murah daripada bahan-bahan lain. Sebaliknya kualitas medan magnet yang terbaik dapat dihasilkan oleh *sidu / neodium*, harganya jauh lebih mahal bila dibandingkan dengan bahan yang lain.

2.1.5. *Voice Coil*

Voice coil merupakan bagian terpenting dari sebuah *speaker*. *Voice coil* terdiri dari *bobbin* (tempat menggulung *coil*) dan *coil* (merupakan gulungan BWR → *Brass Wire Rope*). *Coil* ini akan bergerak sesuai dengan sinyal yang diterima. Ada beberapa bahan pembentuk *bobbin* diantaranya:

- *Paper*
- *Aluminium* terbagi atas 2 bagian yaitu:
 - a. *Aluminium 2-lock*, berwarna merah
 - b. *Aluminium PSVW*, berwarna kuning
- *Kraft Paper*
- *NSV*
- *Kapton* (kaca film yang ringan)
- *Till* (kaca film dengan permukaan dalam yang kasar)

Sedangkan untuk *coil* dapat digunakan berbagai Brass Wire Rope (BWR), diantaranya:

- *BWR 2-lock*
- *BWR PSVW*
- *BWR CCAW* yang terdiri dari 2 bagian lagi yaitu:
 - a. *BWR CCAW 2-lock* (merah)
 - b. *BWR CCAW PSVW* (kuning)

2.1.6. *Spieder / Damper*

Spieder atau *damper* digunakan sebagai suspensi dari *speaker* yang berfungsi untuk meredam getaran yang ditimbulkan oleh *voice coil*, sehingga *voice coil* dapat bergerak leluasa.

2.1.7. *Cone Paper*

Cone paper merupakan bagian dari suspensi dari *speaker* yang berfungsi sekaligus sebagai penguat getaran yang ditimbulkan oleh *voice coil* sehingga dapat terbentuk suara yang jelas dari sinyal yang diterima oleh *speaker*. *Cone paper* sendiri terdiri atas 2 bagian yaitu *cone* dan *foam*. Bentuk *cone paper* sendiri ada beberapa macam yaitu jenis *up-roll*, *down-roll*, dan *fixed*. Ada beberapa bahan untuk membuat *cone* antara lain:

- *Paper*
- *PP Plastic*
- *PP Carbon*
- *Transparant*
- *Mika*

Sedangkan bahan untuk *foam* yaitu:

- *Foam*
- *Cloth*
- *Rubber*

2.1.8. *Lead Wire*

Lead wire merupakan BWR yang dipergunakan untuk menghubungkan sumber signal ke *voice coil*. Ujung yang satu dari *lead wire* disolder ke ujung dari *voice coil* sedangkan yang lain disolder ke terminal.

2.1.9. *Eyelet*

Eyelet berbentuk 2 (dua) lubang kecil dimana ujung *lead wire* yang menuju terminal disolder juga ditempat ini. Hal ini dilakukan untuk menjaga agar *lead wire* tidak mengganggu getaran dari *cone paper*, yang dapat mengakibatkan produksi suara dari *loudspeaker* menurun.

2.1.10. Terminal

Setelah melewati *eyelet*, *lead wire* dihubungkan ke *terminal*. *Terminal* ini berfungsi sebagai jalan masuk *signal-signal* dari luar ke dalam *loudspeaker*.

2.1.11. Dust Cap

Dust cap berfungsi sebagai penyalur getaran suara bersama *cone paper* dan untuk melindungi bagian dalam *speaker* (celah udara tempat *voice coil* bergerak) dari debu dan kotoran yang ada.

Ada berbagai bahan yang dapat dipakai pada *dust cap* yaitu:

- *Cloters*
- *MC* (milar)
- *PP*

2.1.12. Gasket

Gasket merupakan bagian yang berfungsi sebagai penahan pada *cone paper*, juga bermanfaat untuk memperindah bentuk *loudspeake*. *Gasket* diletakkan pada pertemuan *cone paper* dengan *frame*.

Ada berbagai bahan pembentuk *gasket*, antara lain:

- *EVA* (bentuknya seperti spon)
- *Paper*
- *PVC*

Pada *speaker* mobil, *gasket* memiliki fungsi tambahan untuk menempelkan *speaker* ke *grill* (penutup luar *speaker* mobil).

Dalam mendesain suatu kotak *subwoofer* perlu diketahui terlebih dahulu karakteristik dari *speaker subwoofer* yang akan digunakan. Karakteristik dari *speaker subwoofer* yang akan digunakan sangat menentukan ukuran dari kotak tersebut, supaya dapat menghasilkan frekuensi resonansi yang sesuai.

Speaker subwoofer pada umumnya mempunyai tanggapan terhadap frekuensi kurang dari 500 Hz. Berikut ini adalah daftar karakteristik dari *speaker subwoofer* yang perlu diketahui dalam mendesain kotak *speaker subwoofer* yaitu:

- f_s = frekuensi terendah yang keluar dari *speaker* yang masih dapat didengar oleh telinga manusia.
- $Q = Q_{driver}$ total (dapat ditulis dengan Q_{TS} atau Q_T). Q adalah nilai yang menjelaskan tentang derajat kontrol yang ditunjukkan oleh *speaker*. Jika nilai Q rendah, maka respon *speaker* akurat dan cepat berubah dalam menerima informasi *audio*.
- $Q_e = electrical\ Q$.
- $Q_m = mechanical\ Q$.
- V_{AS} = volume udara yang dibutuhkan oleh *speaker*, supaya dapat beraksi seperti pegas.
- V_b = volume kotak netto.
- f_b = frekuensi kotak resonansi.
- f_3 = frekuensi cut off sistem, turun $-3dB$.
- R_e = hambatan *speaker coil* DC.

2.2. Kotak *Speaker* (*speaker box*)

Jenis dan karakteristik dari kotak *speaker* juga perlu diperhatikan karena untuk memperoleh hasil akhir yang bagus kotak *speaker* ini juga merupakan salah satu bagian yang penting. Agar dapat dihasilkan nada *bass* yang sesuai dengan keinginan, maka perlu diperhatikan kesesuaian antara kotak *speaker* dan kegunaannya. Berikut ini adalah 3 jenis kotak *speaker*, yaitu:

- Kotak Rapat (*Sealed Box*)
- Kotak Bass Reflek (*Vented Box*)
- Kotak Rapat dan Celah (*Bandpass Box*)
- Kotak *double cavity*

2.2.1. Kotak Rapat (*Sealed Box*)

Kotak rapat ini merupakan kotak yang terdiri dari satu ruang dan satu lubang saja yaitu pada lubang *speaker*. Seluruh sisi-sisi pada kotak ini harus tertutup rapat (*sealed*) dan tidak boleh ada udara yang masuk, maupun keluar dari kotak ini. Kotak ini menggunakan udara sebagai suspensi untuk *speaker*-nya. Bentuk kotak ini dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Kotak Rapat (*Sealed Box*)

Sumber: <http://www.info@incaradvice.com>

Kotak rapat ini mempunyai beberapa keunggulan antara lain:

- Desain dan konstruksinya sederhana sehingga mudah dibuat.
- Kotak ini tidak memerlukan volume yang besar sehingga cukup praktis.
- Toleransi terhadap kesalahan pengukuran asalkan kesalahan pengukuran itu tidak terlalu besar.
- Tanggapan frekuensinya dimulai cukup rendah dan nada *bass* yang dihasilkannya cukup lembut.

Dalam mengukur volume dari kotak rapat yang harus diketahui pertama adalah karakteristik dari speaker subwoofer. Setelah diketahui karakteristik speaker subwoofer, harus diketahui juga *Efficiency Bandwidth Product* (EBP). Cara untuk menghitung EBP adalah sebagai berikut:

$$EBP = \frac{f_s}{Q_e} \quad (2.1)^1$$

Untuk sebuah kotak rapat sebaiknya $EBP < 100$. Bila variabel Q_e dan Q_m diketahui, maka nilai Q_T dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2

$$Q_T = \frac{1}{\left(\frac{1}{Q_m}\right) + \frac{R_s}{(R + R_s) Q_e}} \quad (2.2)^2$$

R pada persamaan di atas adalah hambatan dari pengkabelan yang besarnya $0,5 \Omega$.

Alternatif lain adalah menggunakan Q_T yang spesifik dalam parameter TS.

Kurang lebih diharapkan nilainya adalah:

$$Q_e = 1,25Q_T \quad (2.3)^3$$

$$Q_m = 5Q_T \quad (2.4)^4$$

¹ Ibid p.27

² Ibid p.27

³ Ibid p.28

⁴ Ibid p.28

Untuk menghitung volume kotak yang ideal, bisa digunakan metode Thiele's yang dipilih berdasarkan Q_T dan dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Tabel Desain Kotak Ideal

Alignment			Box Design				
No	Type	Ripple (Db)	f_3/f_s	f_b/f_s	V_b/V_{AS}	Q_T	
1	QB ₃	-	2,68	2,000	0,0954	0,180	
2	QB ₃	-	2,28	1,730	0,1337	0,209	
3	QB ₃	-	1,77	1,420	0,2242	0,259	
4	QB ₃	-	1,45	1,230	0,3390	0,303	
5	B ₄	-	1,000	1,000	0,7072	0,383	optimally flat
6	C ₄	-	0,867	0,927	0,9479	0,415	
7	C ₄	0,13	0,729	0,829	1,372	0,446	
8	C ₄	0,25	0,641	0,757	1,790	0,518	
9	C ₄	0,55	0,600	0,716	2,062	0,557	
9,5	C ₄	1,52	0,520	0,638	2,60	0,625	

Sumber: <http://www.enclosuredesignworksheet.com>

Jika menggunakan tabel desain kotak ideal sedikit disarankan untuk menaikkan volume sebesar 30% hal ini bertujuan untuk mengganti kekurangan pada kotak. Nilai f_b pada tabel di atas didapatkan dengan menggunakan perhitungan ketika $Q_T < 0,5$:

$$f_b = 0,38f_s/Q_T \text{ untuk kotak yang ideal}$$

$$f_b = 0,4f_s/Q_T \text{ apabila pengurangan kotak dengan } Q_B = 7$$

Disarankan volume dari kotak antara:

$$V_b > 2 \times V_{AS} (Q_T^2)$$

$$V_b < 10 \times V_{AS} (Q_T^2)$$

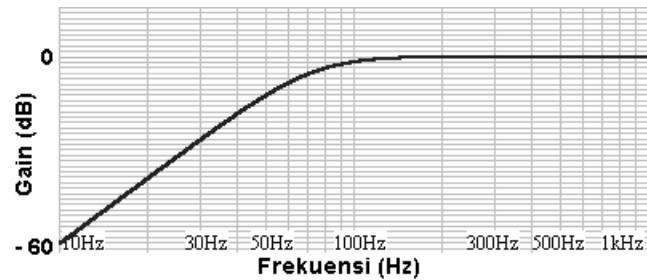
Dan frekuensi f_3 -3dB dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

2.5

$$f_3 = \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_b}} \quad (2.5)^5$$

Untuk respon frekuensi dari kotak rapat ini dapat dilihat pada gambar 2.5.

⁵ Ibid p.29



Gambar 2.5. Respon Kotak Rapat

Sumber: <http://www.info@incaradvice.com>

2.2.2. Kotak *Bass* Reflek (*Vented Box*)

Kotak *bass* refleksi ini terdiri dari sebuah ruang dan sebuah pipa berlubang (*port*) pada sisi depan dari kotak *speaker*. Lubang udara ini sangat membantu dalam menghasilkan frekuensi rendah. Ukuran dari lubang udara ini dapat diubah-ubah supaya dapat mencapai respon frekuensi yang berbeda. Hal terpenting dalam membuat kotak *bass* refleksi ini adalah mendapatkan ukuran kotak dan *port* yang tepat. Bentuk dan ukuran dari *port* ini dapat bermacam-macam, tetapi pada umumnya berbentuk bulat dan memanjang. Semakin besar *port*, maka semakin kecil *noise* yang timbul diakibatkan udara yang keluar masuk. Batas dari ukuran dan panjang *port* ini ditentukan oleh bentuk fisik kotak dan daerah instalasi. Jarak antara *port* dengan *speaker* yang baik adalah dua kali diameter *port*, karena di sekitar *woofer* terjadi perbedaan tekanan. Lubang *port* pada kotak ini tidak boleh terhalang, karena banyak suara yang keluar dari *port* ini.

Cara kerja dari kotak *bass* refleksi ini adalah dengan menggunakan gelombang *bass* hasil dari *speaker* dan pipa resonator yang saling memperkuat sehingga tekanan/tendangan *bass* akan dihasilkan lebih kuat dibanding dengan jenis kotak rapat. Bentuk dari kotak *bass* refleksi ini dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Kotak *Bass* Reflek (*Vented Box*)

Sumber: <http://www.info@incaradvice.com>

Kotak *bass* refleksi ini mempunyai beberapa kelebihan antara lain yaitu dapat menghasilkan suara murni yang bagus, nada *bass* yang keluar dari kotak ini dapat dimodifikasi tanpa merubah ukuran kotak yaitu dengan cara merubah diameter dan panjang dari *port*, saat nada *bass* yang tinggi tidak terjadi distorsi dan pada 3-4 dB lebih efisien secara keseluruhan daripada desain dari kotak rapat.

Selain memiliki keunggulan kotak ini juga memiliki kekurangan yaitu:

- Kontruksinya harus sangat *solid*, karena tekanan udara di sekitar *port* amat tinggi.
- Tanggapan frekuensinya tidak terlalu bagus, sehingga suara yang dikeluarkan tidak sejernih atau secepat kotak rapat.
- Desainnya yang lebih rumit dan kompleks daripada kotak rapat sehingga sulit untuk didapatkan performanya yang terbaik.

Untuk perhitungan kotak *bass* refleksi ini tidak beda jauh dengan kotak rapat hanya saja pada $EBP > 100$. Pada kotak *bass* refleksi terdapat *port* yang digunakan sebagai Helmholtz. Untuk memperoleh ukuran *port* dari sebuah kotak speaker, maka dapat dilihat persamaan berikut:

Minimum *port* diameter:

$$dv \geq 39,37 \times \left(\frac{411,25 \times Vd}{\sqrt{Fb}} \right)^{0,5}$$

$$dv \geq 39,37 \times (Fb \times Vd)^{0,5}$$

- dv = diameter yang dibutuhkan oleh *port* dalam inchi.
- Fb = tuning frekuensi pada kotak dalam Hz.

- V_d = volume yang menggantikan driver (m^2) melalui penyimpangan penuh (*peak to peak*)

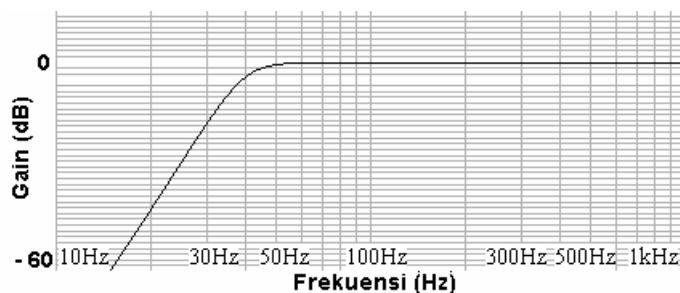
Sedangkan untuk mengukur panjang *port* dibutuhkan persamaan:

$$L_v = \frac{1,463 \times 10^7 R^2}{F_b^2 V_b} - 1,463R \quad (2.6)^6$$

- F_b = tuning frekuensi pada kotak dalam Hz.
- L_v = panjang dari *port* dalam inchi.
- R = jari-jari dalam dari tabung *port*.

V_b = volume dalam kotak (inchi). Untuk mengubah *cubic feet* menjadi *cubic inches*, dikalikan dengan 1728.

Untuk hasil respon dari kotak *bass* refleksi ini dapat dilihat pada gambar 2.7.



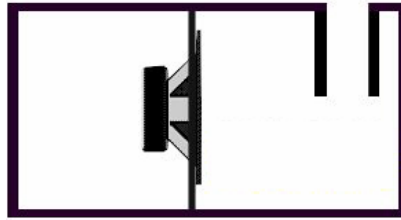
Gambar 2.7. Respon kotak *bass* refleksi

Sumber: <http://www.info@incaradvice.com>

2.2.3. Kotak Rapat dan Celah (*Bandpass Box*)

Kotak rapat dan celah ini merupakan gabungan dari dua tipe kotak sebelumnya yaitu kotak rapat dan kotak *bass* refleksi. Di dalam *bandpass box* ini terdapat dua kotak. Kotak yang pertama berfungsi sebagai kotak rapat dan pada kotak yang kedua berfungsi sebagai kotak *bass* refleksi. Tanggapan frekuensi dari *bandpass box* ini lebih sempit dan terfokus ke bidang nada rendah. Bentuk dari *bandpass box* ini dapat dilihat pada gambar 2.8.

⁶ Ibid p.29



Gambar 2.8. Kotak Rapat dan Celah (*Bandpass Box*)

Sumber: <http://www.info@incaradvice.com>

Bandpass box ini memiliki beberapa keunggulan yaitu dapat didesain untuk menghasilkan efisiensi yang tinggi pada range frekuensi yang sempit atau kotak dapat didesain untuk menghasilkan efisiensi yang rendah pada range frekuensi yang lebar. *Port* pada *bandpass box* ini membuat efisiensi menjadi rendah tetapi dapat meningkatkan range *bass*. Di dalam *bandpass box* ini terjadi tekanan yang tinggi dan jika ada kebocoran udara maka hal ini akan sangat mempengaruhi performanya. Karena *speaker* berada di dalam kotak maka *cone speaker* terlindung dari gangguan yang berasal dari luar.

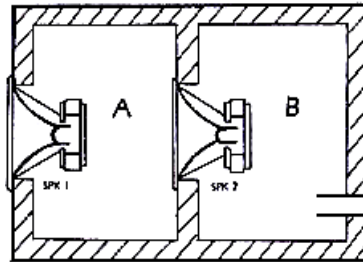
Di samping memiliki keunggulan *bandpass box* ini juga memiliki kekurangan yaitu:

- Kontruksi kotak ini sangat kompleks dan rumit sehingga sulit untuk didesain.
- Kotak ini hanya didesain untuk *low frequency performance*.
- Volume kotak yang lebih besar antara 50% hingga 100% bila dibandingkan dengan kotak rapat dan kotak bass refleksi.
- Sangat sensitif terhadap kesalahan perhitungan dan kontruksi.
- *Bandpass box* ini memiliki tanggapan frekuensi yang paling buruk, apabila dibandingkan terhadap kotak rapat dan kotak bass refleksi.

Untuk pengukuran kotak rapat dan celah ini sama dengan pengukuran pada *bass refleksi*.

2.2.4. Kotak *Double Cavity*

Kotak dengan *double cavity* ini merupakan penggabungan antara kotak rapat (*sealed box*) dan kotak *bass refleksi* (*vented box*), hanya saja perbedaannya pada *speaker* yang digunakan dan juga posisi dari *speaker* tersebut. Gambar 2.9. merupakan salah satu bentuk kotak dari *double cavity*.



Gambar 2.9. Kotak *double cavity*

Sumber: <http://www.info@incaradvice.com>

Pada setiap kotak mempunyai satu *driver speaker* dalam posisi arah yang sama. Kotak A merupakan kotak terdepan, kotak ini sesungguhnya kotak yang menerbitkan suara, sedangkan kotak B yang ada di belakangnya hanyalah kotak pembantu. Kedua *speaker* (*speaker 1* dan *2*) terjalin dalam hubungan satu fasa. Apabila konus speaker 1 bergerak maju ke depan, maka konus speaker 2 juga maju ke depan, sebaliknya jika konus speaker 1 mundur ke belakang, maka konus speaker 2 juga bergerak mundur. Akibatnya volume udara dalam rongga kotak A selamanya konstan sama besar, begitupun dengan tekanan udara di dalam rongga A juga konstan sama besar meskipun konus bergetar hebat. Adanya tekanan udara maju-mundur yang konstan membuat gerakan konus benar-benar linear sama besar antara bagian maju dan bagian mundur.

2.3. Bahan Kotak *Speaker*

Bahan untuk kotak *speaker* ini tersedia berbagai macam dan jenis di pasaran. Dan harga dari bahan ini bermacam-macam tergantung pada kualitasnya. Masing-masing bahan ini mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Bahan yang bagus untuk kotak *speaker* ini harus memenuhi syarat-syarat berikut:

- Tingkat kepadatannya harus cukup tinggi.
- Keras sehingga kuat untuk menahan berbagai macam tekana yang terjadi di dalam kotak *speaker* dan getaran dari *speaker*.
- Tidak mudah menyebabkan terjadinya distorsi.
- Tidak mudah menyerap air

- Tidak mengeluarkan bunyi ketukan.
- Daya redamnya kecil sehingga suara yang timbul tidak akan teredam di dalam kotak, kecuali bila kotak *speaker* yang berukuran terlalu besar maka membutuhkan daya redam yang tinggi supaya *noise* yang timbul dapat dihilangkan.

Bahan-bahan yang umum digunakan untuk kotak *speaker* ini adalah partikel, *plywood* dan MDF (*Medium Density Fiberboard*), berikut ini akan dijelaskan tentang karakteristik dari masing-masing bahan ini:

a. Partikel

Partikel ini terbuat dari campuran kayu yang padat. Bahan ini memiliki daya redam yang tinggi bila dibandingkan dengan *plywood* dan MDF. Hal ini disebabkan karena di dalam bahan ini terdapat banyak rongga udara yang cukup besar. Ukuran partikel pada bahan ini ada yang besar dan ada yang kecil, untuk mendapatkan hasil yang bagus pada umumnya digunakan yang ukuran partikelnya kecil. Tingkat kepadatan pada bahan ini kurang bagus tetapi bahan ini merupakan bahan yang termurah yang ada di pasaran.

b. Plywood

Plywood adalah bahan yang terdiri dari lapisan-lapisan kayu yang tipis. Bahan ini memiliki kualitas yang lebih baik bila dibandingkan dengan partikel, karena susunan bahan penyusunnya yang lebih padat daripada papan partikel. Tingkat redaman bahan ini tidak begitu tinggi sehingga suara yang ada di dalam kotak tidak banyak yang terserap. Harga dari *plywood* ini lebih mahal apabila dibandingkan dengan partikel.

c. MDF (*Medium Density Fiberboard*)

MDF adalah bahan yang terbuat dari serat kayu yang direkatkan dengan panas dan tekanan. Permukaan bahan ini rata dan halus selain itu juga mudah untuk dibentuk. Tingkat kepadatan bahan ini sangat tinggi karena tidak memiliki rongga udara di dalamnya, sehingga kuat untuk menahan getaran dan tekanan dari *speaker*. Daya redamnya cukup rendah karena MDF adalah bahan yang tingkat kepadatannya lebih tinggi daripada partikel dan *plywood*. Karena kualitasnya yang bagus maka MDF ini adalah bahan yang memiliki harga termahal di antara ketiga bahan kotak *speaker*.

2.4. Operational Amplifier (Op-Amp)

Operational Amplifier sering disebut dengan op-amp. Op-amp yang digunakan yaitu TL084. Adapun kelebihan dari TL084, yaitu :

1. Noise yang terdapat pada TL084 sangat kecil
2. Terdapat pelindung pada *output*, apabila terjadi hubungan pendek pada rangkaian
3. Memiliki input bias yang kecil dan menutup arus yang melewati
4. Mempunyai jarak *common-mode* sampai dengan V_{cc}^+
5. Jarak tegangan yang berbeda-beda.

2.4.1. Active Low Pass Filter

Pada desain sistem *subwoofer* yang akan digunakan, yaitu *active low pass filter* yang berfungsi untuk membatasi frekuensi yang akan dihasilkan dan hanya frekuensi sampai tertentu saja yang dapat dihasilkan. Penggunaan *active low pass filter* pada sistem *subwoofer* bertujuan supaya hanya frekuensi rendah (nada *bass*) saja yang dihasilkan sedangkan frekuensi tinggi tidak dapat dihasilkan. Pada *active low pass filter* ini terjadi pembatasan frekuensi yang diteruskan dan yang ditahan. Frekuensi yang berada di bawah frekuensi *cut off* akan diteruskan masuk sedangkan frekuensi yang di atas frekuensi *cut off* akan ditahan dan terjadi penurunan *gain*. Penurunan *gain* frekuensi yang diinginkan tergantung pada orde *filter* yang digunakan.

Rangkaian *active low pass filter* ini berbeda dengan *passive low pass filter*. Dari segi komponen yang digunakan pada *active low pass filter* digunakan *op-amp*, *resistor* dan *capasitor*, sedangkan pada *passive low pass filter* menggunakan *inductor*, *resistor* dan *capasitor*. Dari segi peletakan rangkaian, pada *active low pass filter* dipasang pada sesudah *input* dan sebelum *power amplifier*, sedangkan pada *passive low pass filter* dipasang pada sesudah *power amplifier* dan sebelum *speaker*. Dipandang dari segi biaya, pada *active low pass filter* lebih mahal dibandingkan dengan *passive low pass filter*. Jika dilihat dari segi penguatan (*gain*), pada *active low pass filter* terdapat penguatan, tetapi pada *passive low pass filter* ini tidak ada penguatan. *Passive low pass filter* ini sangat bagus untuk

bekerja pada frekuensi radio, tetapi jika frekuensi tiba-tiba turun maka induktor mempunyai masalah, karena induktor pada frekuensi radio secara fisik ukurannya besar dan cukup berat, oleh karena itu cukup mahal. Untuk meningkatkan induktansi pada aplikasi frekuensi yang lebih rendah, diperlukan lilitan kabel yang lebih banyak. Pada *active low pass filter* mempunyai batasan-batasan. Respon pada frekuensi tinggi dibatasi oleh *gain bandwidth* dan *slew rate* dari op-amp.

Sebelum dibahas lebih lanjut tentang *active low pass filter* ini akan dibahas terlebih dahulu tentang *oktaf*, *decade* dan *decibel*(dB).

- Oktaf

Yang disebut dengan satu *oktaf* adalah kenaikan frekuensi sebesar dua kali frekuensi mula-mula. Misalnya 50 Hz sampai 100 Hz disebut satu *oktaf*.

- Decade

Yang disebut dengan satu *decade* adalah kenaikan frekuensi sebesar sepuluh kali frekuensi mula-mula. Misalnya 50 Hz sampai 500 Hz disebut satu *decade*.

- Decibel (dB)

Decibel (dB) pada umumnya digunakan untuk menyatakan derajat penguatan atau pelemahan. Bisa juga digunakan untuk menyatakan tegangan, arus, daya *output* dan banyak lainnya, misalnya:

- $\text{dB} = 20 \log \left(\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right)$, persamaan ini digunakan untuk menyatakan derajat

penguatan atau pelemahan dari tegangan output terhadap tegangan input.

- $\text{dB} = 20 \log \left(\frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} \right)$, persamaan ini digunakan untuk menyatakan derajat

penguatan atau pelemahan dari arus output terhadap arus input.

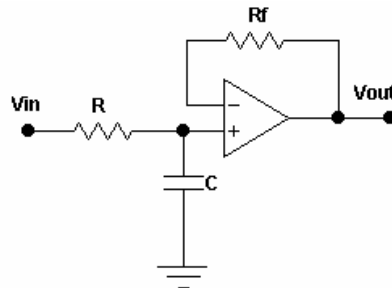
- $\text{dB} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right)$, persamaan ini digunakan untuk menyatakan derajat

penguatan atau pelemahan dari daya output terhadap tegangan input.

2.4.1.1. Active Low Pass Filter Orde Pertama

Active low pass filter orde pertama ini menggunakan *op-amp* yang mempunyai konfigurasi *non-inverting* (tidak membalik sinyal *input* yang masuk) dengan inputnya yang berupa satu buah *resistor* yang dipasang secara seri dan

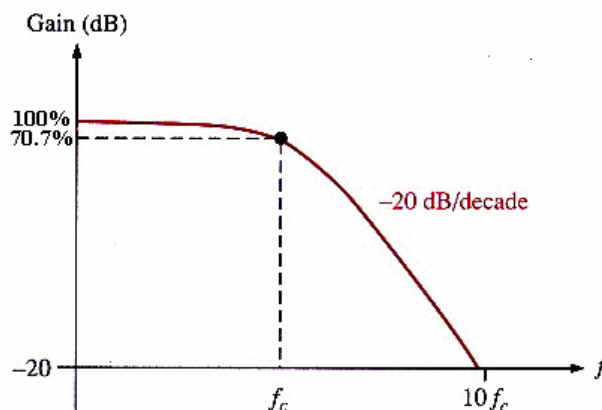
satu buah *capasitor* yang dipasang secara paralel dengan *ground*. Gambar dari rangkaian *active low pass filter* orde pertama ini terlihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10. *Active Low Pass Filter* Orde Pertama

Sumber: Floyd, Thomas L. *Electronic Devices*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc, 1996, p. 845

Pada orde pertama ini terjadi penurunan gain frekuensi di atas frekuensi *cut off* sebesar -20 dB/dekade. Gambar respon frekuensi dari orde pertama *active low pass filter* dapat dilihat pada gambar 2.11. :



Gambar 2.11. Respon Frekuensi *Active Low Pass Filter* Orde Pertama

Sumber: Floyd, Thomas L. *Electronic Devices*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc, 1996, p. 845

Penjabaran dari gambar 2.11. yaitu yang pertama adalah tegangan yang berbeda pada *input inverting* dan *input non inverting* adalah 0 volt. Oleh karena itu, tegangan jarak lintas kapasitor (C) sama dengan tegangan output (V_{out}),

karena rangkaian ini merupakan *voltage follower*. Tegangan input (V_{in}) pembagi antara resistor (R) dan kapasitor (C). Tegangan kapasitor sama dengan Tegangan output (V_{out}), sehingga menjadi

$$V_{out} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} \times V_{in}$$

Jadi

$$\bar{A}_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (2.7)^7$$

Sebagai syarat nilai dari \bar{A}_{CL} adalah 0,707 dengan sudut fasa -45° dan $\omega = \omega_c$, sehingga menjadi

$$\bar{A}_{CL} = \frac{1}{1 + R^2\omega^2C^2} - j \frac{\omega RC}{1 + R^2\omega^2C^2}$$

$$\text{Arc tgn} \frac{\text{Im}}{\text{Re}} = \text{sudut fasa } -45^\circ$$

$$\text{Arc tgn } -\omega_c RC = \text{sudut fasa } -45^\circ$$

$$\omega_c RC = \text{tgn } 45^\circ$$

$$\omega_c = \frac{1}{RC}$$

dan menjadi

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.8)^8$$

Untuk menghasilkan sebuah *active low pass filter* orde satu yang baik, maka design prosedur yang perlu diikuti adalah :

1. Pilih frekuensi *cut off* yang hendak digunakan.
2. Pilih nilai resistor (R, R_f) untuk perancangan diatas dengan mempertimbangkan hal praktis diantara 10 K Ω sampai dengan 100 K Ω .
3. Hitunglah nilai kapasitor dari *filter* tersebut dengan menggunakan persamaan (2.8).
4. Ambil nilai terdekat untuk kapasitor dan hitung kembali nilai resistor nya.

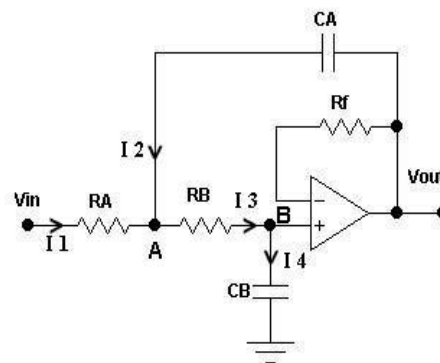
⁷ Floyd, Thomas L. *Electronic Devices*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc, 1996, p. 844

⁸ Ibid p. 844

2.4.1.2. Active Low Pass Filter Orde Kedua

Pada *active low pass filter* orde kedua ini menghasilkan penurunan *gain* frekuensi lebih besar dua kali daripada yang terjadi pada orde pertama.

Untuk gambar dari rangkaian *active low pass filter* orde kedua ini dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2.12. *Active Low Pass Filter* Orde Kedua

Sumber: Floyd, Thomas L. *Electronic Devices*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc, 1996, p. 847

Pada gambar rangkaian diatas dapat dibuat persamaan sebagai berikut :

- $I_1 = \frac{V_{in} - V_A}{R_1}$
- $I_2 = (V_{out} - V_A) j\omega C_2$
- $I_3 = \frac{V_A - V_B}{R_2}$
- $I_4 = j\omega C_1 V_B$

Karena $E_d = 0$ maka V_B sama dengan V_{out} , sehingga pada

$$I_3 = \frac{V_A - V_{out}}{R_2}, \text{ dan } I_4 = j\omega C_1 V_{out}.$$

Dan juga karena tidak arus yang masuk ke op-amp, maka $I_3 = I_4$, sehingga

$$V_A = V_{out} + j\omega C_1 R_2 V_{out}. \quad (2.9)^9$$

⁹ibid p. 845

Jadi pada I_3 merupakan penjumlahan dari I_1 dan I_2 , sehingga nantinya akan diketahui persamaan \bar{A}_{CL} .

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$\frac{V_{in} - V_A}{R_1} + (V_{out} - V_A) j\omega C_2 = \frac{V_A - V_{out}}{R_2} \quad (2.10)^{10}$$

Persamaan (2.9) dan (2.10) disubsitusikan menjadi

$$\frac{V_{in} - V_{out} - j\omega C_1 R_2 V_{out}}{R_1} + \omega^2 C_1 C_2 R_2 V_{out} = j\omega C_1 V_{out}$$

Dengan syarat $R_1=R_2=R$ dan $C_2=2C_1$, sehingga \bar{A}_{CL} menjadi

$$\bar{A}_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{(1 - 2\omega^2 C_1^2 R^2) + j(2\omega C_1 R)} \quad (2.11)^{11}$$

Sebagai syarat untuk frekuensi cutoff yaitu $\omega = \omega_C$ dan syarat nilai \bar{A}_{CL} adalah 0,707 dengan sudut fasa -90° , sehingga menjadi persamaan yaitu

$$\bar{A}_{CL} = \frac{1 - 2\omega^2 C_1^2 R^2}{(1 - 2\omega^2 C_1^2 R^2) + (2\omega C_1 R)^2} - j \frac{(2\omega C_1 R)}{(1 - 2\omega^2 C_1^2 R^2) + (2\omega C_1 R)^2}$$

$$\text{Arc tgn} \frac{\text{Im}}{\text{Re}} = \text{sudut fasa } -90^\circ$$

$$\text{Arc tgn} \frac{-2\omega C_1 R}{1 - 2\omega^2 C_1^2 R^2} = \text{sudut fasa } -90^\circ$$

$$\frac{-2\omega C_1 R}{1 - 2\omega^2 C_1^2 R^2} = \text{tgn } 90^\circ$$

$$1 - 2\omega^2 C_1^2 R^2 = 0$$

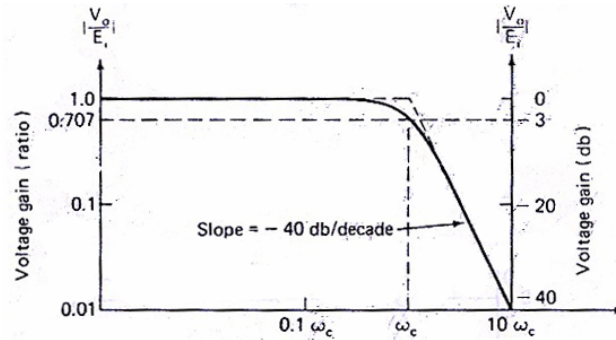
$$\omega_C = \sqrt{\frac{1}{2C_1^2 R_2}} = \frac{0,707}{C_1 R} \quad (2.12)^{12}$$

Pada orde pertama ini terjadi penurunan gain frekuensi di atas frekuensi *cut off* sebesar -40 dB/dekade. Gambar respon frekuensi dari orde kedua *active low pass filter* dapat dilihat pada gambar 2.13. :

¹⁰ Ibid p. 845

¹¹ Ibid p. 845

¹² Ibid p. 845



Gambar 2.13. Respon Frekuensi *Active Low Pass Filter* Orde Kedua

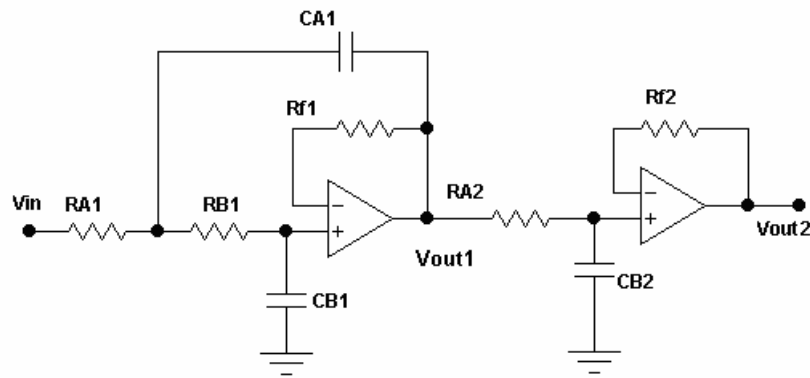
Sumber: Coughlin, Robert F. *Amplifiers and Linear Integrated Circuits*. 2th ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc, 1996, p. 254

Untuk menghasilkan sebuah *active low pass filter* orde satu yang baik, maka design prosedur yang perlu diikuti adalah :

1. Pilih frekuensi *cut off* yang hendak digunakan.
2. Pilih nilai *capasitor* (C_1) antara 100pF dan 0.1 μ F
3. pilih $C_2 = 2 C_1$
4. Hitunglah nilai *resistor* dari *filter* tersebut dengan menggunakan persamaan 2.12
5. Pilih $R_f = 2 R$.

2.4.1.3. *Active Low Pass Filter* Sistem *Cascada*

Baik orde pertama maupun orde kedua *active low pass filter* bisa digunakan secara *cascada* (penggabungan). Penggabungan dari orde pertama dan orde kedua menghasilkan orde ketiga, penggabungan dari orde kedua dengan orde kedua menghasilkan orde keempat. Gambar dari rangkaian *active low pass filter* orde ketiga terlihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. Active Low Pass Filter Orde Ketiga

Sumber: Floyd, Thomas L. *Electronic Devices*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc, 1996, p. 849

Untuk diketahui bahwa persamaan yang digunakan pada orde ketiga ini dengan perkalian antara kedua orde tersebut.

$$\bar{A}_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{V_{out}}{V_{out1}} \times \frac{V_{out1}}{V_{in}},$$

dengan substitusi dari persamaan (2.7) dan (2.11), serta dengan syarat $R_1=R_2=R_3=R$ dan $C_1 = \frac{1}{2} C_3$, $C_2 = 2 C_3$ menjadi

$$\bar{A}_{CL} = \frac{1}{1 + j\omega R C_3} \times \frac{1}{(1 - 2\omega^2 C_3^2 R^2) + j(\omega C_3 R)}$$

Dan dengan syarat frekuensi cut off $\omega=\omega_c$, serta syarat nilai \bar{A}_{CL} adalah 0,707 dengan sudut fasa -135° , sehingga menjadi

$$C_3 = \frac{1}{\omega_c R} \tag{2.13}^{13}$$

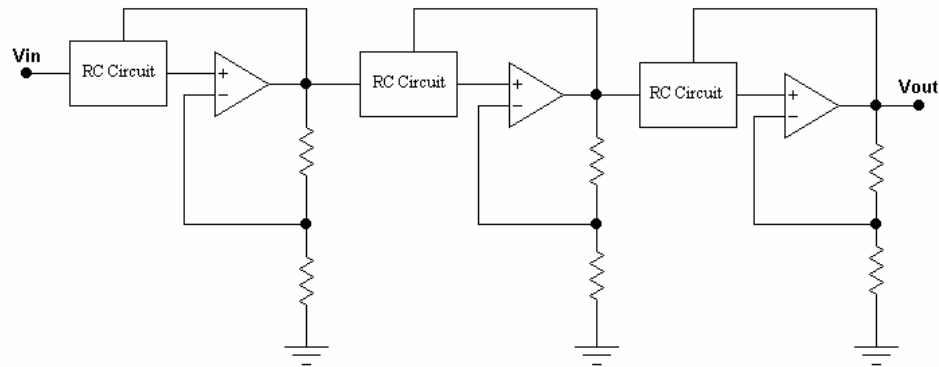
Untuk menghasilkan rangkaian *low pass filter* orde tiga yang baik, maka *design* prosedur yang perlu diikuti sebagai berikut :

1. Dipilih frekuensi *cut off* yang diinginkan (ω_c atau f_c)
2. Pilih nilai C_3 , antara 0,001 dan 0,1 μF
3. Buat $C_1 = 0,5 C_3$ dan $C_2 = 2 C_3$
4. Hitung nilai R dengan menggunakan persamaan 2.13, dimana nilai C yang dimaksud adalah C_3 .
5. Buat $R_1 = R_2 = R_3 = R$, pilih nilai antara 10 $K\Omega$ dan 100 $K\Omega$.

¹³Ibid p. 846

6. Buat nilai $R_{f1} = 2R$ dan $R_{f2} = R$

Penggabungan dari *active low pass filter* ini dapat dilakukan sampai orde keempat, orde kelima dan seterusnya dengan penurunan gain yang terus bertambah. Gambar dari sistem *cascada* orde ke-n terlihat pada gambar 2.15.



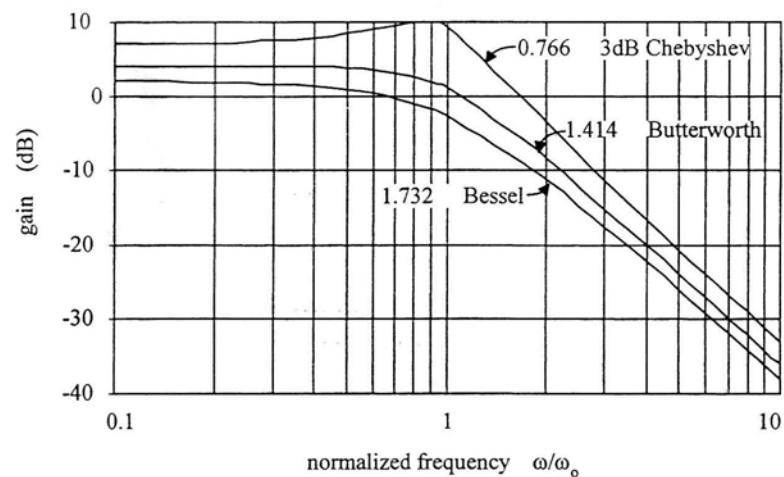
Gambar 2.15. Sistem *Cascada* Orde ke-n *Active Low Pass Filter*

Sumber: Floyd, Thomas L. *Electronic Devices*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall

International, Inc, 1996, p. 846

2.4.2. Tiga Karakteristik Dari *Active Low Pass Filter*

Active low pass filter ini mempunyai 3 macam karakteristik yaitu *Butterworth*, *Chebyshev* dan *Bessel*. Tiap-tiap karakteristik *active low pass filter* ini mempunyai respon frekuensi yang berbeda antara yang satu dengan yang lain. Gambar dari respon frekuensi grafik karakteristik dapat dilihat pada gambar 2.16.



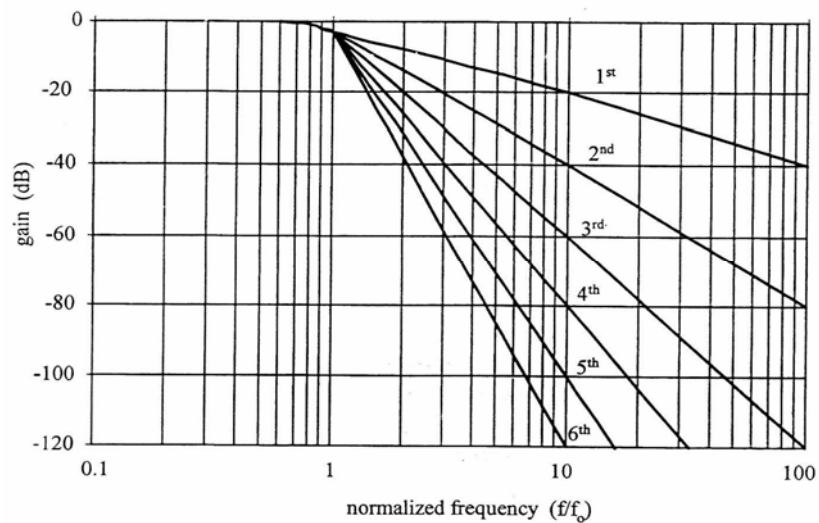
Gambar 2.16. Grafik Respon Frekuensi Karakteristik *Active Low Pass Filter*

Sumber: Jacob, Michael J. *Analog Integrated Circuit Applications*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 2000, p. 418

Active filter yang menggunakan karakteristik *Butterworth*, *Chebyshev* dan *Bessel* mempunyai suatu parameter yaitu *Damping Factor* (DF). *Damping Factor* dari suatu rangkaian *active filter* menentukan karakteristik respon mana yang ditunjukkan oleh *filter*. *Damping Factor* ini akan mempengaruhi respon filter melalui reaksi *negative feedback*.

2.4.2.1. Karakteristik *Butterworth*

Karakteristik *Butterworth* ini memiliki respon amplitudo yang sangat datar pada *pass band* dan menghasilkan penurunan *gain* sebesar -20 dB/dekade dan terjadi pergeseran fasa sebesar 45° pada tiap ordenya. Gambar respon frekuensi dari karakteristik *Butterworth* dapat dilihat pada gambar 2.17.



Gambar 2.17. Respon Frekuensi *Butterworth*

Sumber: Jacob, Michael J. *Analog Integrated Circuit Applications*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 2000, p. 406

Respon fasanya tidak linier dan perpindahan fasa (*time delay*) dari sinyal yang melewati filter ini bermacam-macam terhadap frekuensinya. *Filter* yang menggunakan respon *Butterworth* ini pada umumnya digunakan jika semua frekuensi pada *pass band* harus memiliki *gain* yang sama. Respon dari *Butterworth* ini pada umumnya disebut sebagai *maximally flat response*.

2.4.2.2. Karakteristik *Chebyshev*

Filter yang menggunakan respon karakteristik *Chebyshev* ini berfungsi ketika dibutuhkan penurunan *gain* yang cepat dan berulang-ulang karena rata-rata penurunan *gain*nya lebih besar daripada 20 dB/dekade. Karena rata-rata penurunan *gain*nya lebih besar daripada *Butterworth*, maka *filter* dapat diimplementasikan dengan menggunakan respon karakteristik *Chebyshev* dengan ketentuan yaitu jumlah *pole* yang tidak terlalu banyak dan rangkaian yang tidak terlalu kompleks. *Filter* yang menggunakan respon *Chebyshev* ini memiliki karakteristik pada *overshoot* atau *ripples* pada bagian *pass band* dan respon fasanya kurang linier apabila dibandingkan dengan *Butterworth*.

2.4.2.3. Karakteristik *Bessel*

Respon *Bessel* ini menunjukkan karakteristik fasa yang linier. Hal ini berarti bahwa pergeseran fasa meningkat secara linier terhadap frekuensi. Pada hasil akhirnya hampir tidak ada *overshoot* pada *output*. Karena hal ini maka *filter* yang menggunakan respon *Bessel* pada umumnya digunakan untuk memfilter gelombang pulsa tanpa merubah bentuk pulsa gelombang itu.

2.4.3. *Voltage Follower*

Voltage follower adalah pengisolasian suatu sinyal *input* dari beban dengan menggunakan *gain* tegangan bersama, dengan tanpa fasa atau kebalikan polaritas, dan berfungsi sebagai rangkaian yang ideal dengan impedansi *input* tinggi dan impedansi *output* rendah. *Voltage follower* bisa dikatakan sebagai *non-inverting amplifier* dengan penguatan tegangan (B) sama dengan 1 (satu). Dengan teorema umpan balik *negatif*, diperoleh impedansi *input* dan impedansi *output*.

- Impedansi input (Z_i)

$$\begin{aligned} Z_{in(SP)} &= (1 + A_{OL}B) \times Z_{in} \\ Z_{in(SP)} &= (1 + A_{OL}) \times Z_{in} \end{aligned} \quad (2.14)^{14}$$

Karena penguatan dalam op-amp (A_{OL}) sangat besar maka, nilai 1 (satu) dapat diabaikan, dan impedansi *input* yang diperoleh sangat besar sekali.

$$Z_{in(SP)} \cong A_{OL} \times Z_{IN} \quad (2.15)^{15}$$

- Impedansi output (Z_{out})

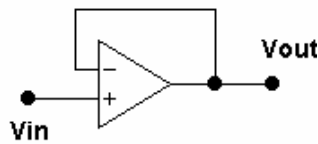
$$\begin{aligned} Z_{out(SP)} &= \frac{Z_{out}}{1 + A_{OL}B} \\ Z_{out(SP)} &\cong \frac{Z_{out}}{A_{OL}} \end{aligned} \quad (2.16)^{16}$$

Impedansi output (Z_{out}) dibagi dengan penguatan dalam dari op-amp yang sangat besar maka, impedansi output ($Z_{out(SP)}$) mendekati nol.

¹⁴ ibid p. 695

¹⁵ ibid p. 695

¹⁶ ibid p. 695



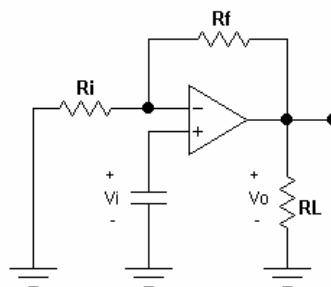
Gambar 2.18. Rangkaian *Voltage Follower*

Sumber: Hill, Mc Graw. *Malvino Elektronik Principles*. United States of America: McGraw-Hill, Inc. 1994. p. 446

Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa besar tegangan *output* sama dengan besar tegangan *input*, selama besar tegangan *output* tidak lebih dari tegangan *supply*. Ini disebabkan dengan adanya tegangan saturasi dan besar tegangan saturasi $\pm 10\%$ dari tegangan *supply*.

2.4.4. *Non-Inverting Amplifier*

Non-Inverting Amplifier merupakan salah satu fungsi daripada Op-Amp dimana terminal keluaran dihubungkan dengan terminal masukan pembalik dan terminal pembalik dihubungkan dengan *ground*, sedangkan terminal tak-membalik dihubungkan dengan sumber *input*. Pada *non-inverting amplifier*, *phase* tegangan *input* dan tegangan *output* adalah sama, dan gain yang terkecil dari *non-inverting amplifier* adalah 1 (satu).



Gambar 2.19. Rangkaian *Non-Inverting Amplifier*

Sumber: Hill, Mc Graw. *Malvino Elektronik Principles*. United States of America: McGraw-Hill, Inc. 1994. p. 446

Ada 6 (enam) langkah yang dilakukan dalam menganalisa non-inverting amplifier adalah sebagai berikut:

- Tegangan pada pin input *non-inverting*:

$$V_{NI} = e_{in} \quad (2.17)^{17}$$

- Selama umpan balik *negatif* dan tegangan *output* tidak saturasi, tegangan pada pin *input inverting*:

$$V_{INV} = V_{NI} = e_{in} \quad (2.18)^{18}$$

- Arus yang melewati R_i :

$$i_{R_i} = \frac{V_{R_i}}{R_i} = \frac{e_{in}}{R_i} \quad (2.19)^{19}$$

- Karena impedansi dari op-amp sangat besar maka, arus yang melewati R_f :

$$i_{R_f} = i_{R_i} = \frac{e_{in}}{R_i} \quad (2.20)^{20}$$

- Tegangan yang ada pada R_f :

$$\begin{aligned} e_{R_f} &= i_{R_f} \times R_f \\ e_{R_f} &= \frac{e_{in}}{R_i} \times R_f \end{aligned} \quad (2.21)^{21}$$

- Tegangan output adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} e_{out} &= V_{R_i} + e_{R_f} \\ e_{out} &= V_{INV} + \frac{e_{in}}{R_i} \times R_f \\ e_{out} &= e_{in} + \frac{R_f}{R_i} \times e_{in} \\ e_{out} &= e_{in} \times \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right) \end{aligned} \quad (2.22)^{22}$$

dimana:

$\left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right)$ adalah *gain* untai tertutup (Acl)

Pada *non-inverting amplifier*, impedansi *input* tidak sama dengan pada *inverting amplifier* karena tegangan yang *input* adalah tegangan *input* yang

¹⁷ Hill, Mc Graw. *Malvino Elektronik Principles*. United States of America: McGraw-Hill, Inc. 1994. p. 446

¹⁸ Ibid p. 446

¹⁹ ibid p. 538

²⁰ ibid p. 538

²¹ ibid p. 538

²² ibid p. 538

dihubungkan dengan pin *input non-inverting* dari op-amp. Dengan teorema umpan balik *negatif*, dapat diperoleh impedansi input dan impedansi *output*.

- Impedansi *input* (Z_{in})

$$Z_{in(SP)} = (1 + A_{OL}B) \times Z_{IN} \quad (2.23)^{23}$$

dimana,

A_{OL} : penguatan dalam op-amp.

Z_{in} : impedansi dalam op-amp.

$Z_{IN(SP)}$: impedansi input seri-pararel.

B : penguatan tegangan umpan balik.

Karena penguatan dalam (A_{OL}) sangat besar maka, impedansi *input* adalah lebih besar dari impedansi *input* op-amp.

- Impedansi *output* (Z_{out})

$$Z_{out(SP)} = \frac{Z_{out}}{1 + A_{OL}B} \quad (2.24)^{24}$$

Karena faktor ($1 + A_{OL}B$) sangat besar maka, impedansi *output* dengan umpan balik adalah mendekati nol.

$$Z_{out(SP)} \cong 0 \quad (2.25)^{25}$$

dimana,

Z_{out} : impedansi *output* op-amp.

$Z_{out(SP)}$: impedansi *output* seri-pararel

2.5. Amplifier

Amplifier merupakan salah satu komponen utama yang penting dalam desain *subwoofer* yang mempunyai fungsi sebagai penguat sinyal *audio*. *Amplifier* ini dibagi ke dalam kelas-kelas yang sesuai dengan pengolahan sinyalnya. Kelas-kelas dalam *amplifier* itu antara lain: *amplifier* kelas A, *amplifier* kelas B, *amplifier* kelas C, *amplifier* kelas D, *amplifier* kelas AB.

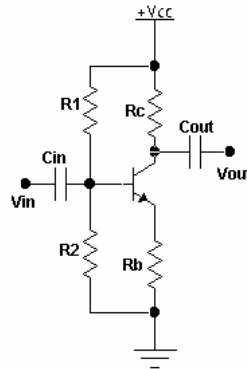
²³ ibid p. 538

²⁴ ibid p. 538

²⁵ ibid p. 538

2.5.1. Amplifier Kelas A

Gambar dari rangkaian *amplifier* kelas A terlihat pada gambar 2.20.

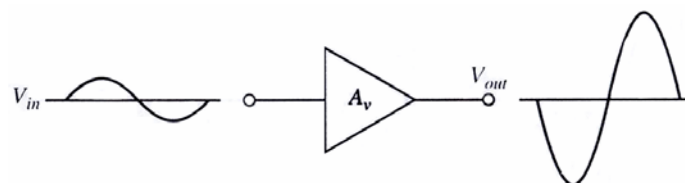


Gambar 2.20. Amplifier Kelas A

Sumber: Schuler, Charles A. *Electronics Principles and Applications*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Company. 1984, p.118

Rangkaian dasar *amplifier* kelas A ini hanya menggunakan sebuah *transistor* saja. Ketika *amplifier* mendapat suatu sinyal *input* yang kecil maka hal ini akan menyebabkan arus basis bertambah besar. Apabila sinyal *input* bertambah besar maka hasil *output* akan bertambah besar hingga arus atau tegangannya mencapai batas limitnya.

Sistem yang digunakan dalam *amplifier* kelas A ini dapat menghasilkan sinyal *output* yang sama dengan sinyal *input*, tetapi telah mengalami penguatan. Gambar sinyal keluaran pada *amplifier* kelas A terlihat pada gambar 2.21.



Gambar 2.21 Sinyal Keluaran Amplifier Kelas A

Sumber: Floyd, Thomas L. *Electronic Devices*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc, 1996, p. 366

Amplifier kelas A ini mempunyai keunggulan yang dapat dilihat dengan jelas pada sinyal keluarannya yang sangat baik dan tidak mengalami cacat. Di samping memiliki keunggulan *amplifier* kelas A ini juga memiliki kekurangan yaitu kurang efisien dan boros daya. Hal ini disebabkan karena *transistor output* yang selalu aktif, sehingga menyebabkan terjadinya panas yang berlebihan. Dan apabila panasnya tinggi maka dibutuhkan pendingin (*heatsink*) yang besar sehingga menjadi berat dan kurang efisien. Karena kekurangannya ini maka *amplifier* kelas A ini seringkali hanya digunakan untuk level rendah atau sebagai penguat yang hanya berdaya kecil.

Untuk perhitungan efisiensi dari *amplifier* kelas A adalah sebagai berikut:

$$\% \text{ efisiensi} = 100 \times \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{supply}}}$$

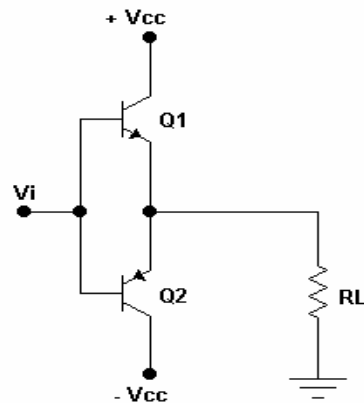
$$\% \text{ efisiensi} = 100 \times \frac{V_p^2 / 8R_L}{V_p^2 / 2R_L}$$

$$\% \text{ efisiensi} = 100 \times \frac{2}{8}$$

$$\% \text{ efisiensi} = 25 \%$$

2.5.2. Amplifier Kelas B

Amplifier kelas B ini seringkali digunakan untuk perancangan penguatan *audio* yang membutuhkan daya besar. *Amplifier* kelas B ini tergolong penguat yang memiliki efisiensi cukup baik dan tidak memerlukan arus yang terlalu besar. *Amplifier* kelas B ini pada umumnya menggunakan sistem *push-pull*, yang berarti pada tingkat keluaran *transistor* terjalin suatu penggabungan. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan daya keluaran serta menghindari terjadinya pemotongan puncak sinyal. Jika dibandingkan dengan *amplifier* kelas A, *amplifier* kelas B ini jauh lebih efisien. Gambar dari *amplifier* kelas B dapat dilihat pada gambar 2.22

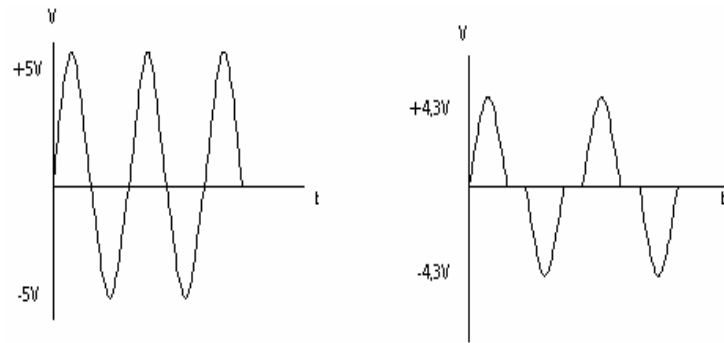


Gambar 2.22 Amplifier Kelas B

Sumber: Mitchell, F.H., Jr and F.H. Mitchell, Sr. *Introduction To Electronic Design*. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc. 1992, p. 476

Rangkaian dasar *amplifier* kelas B ini menggunakan dua *transistor*, yang satu *transistor* jenis NPN dan yang satunya lagi *transistor* jenis PNP. Emitor kedua *transistor* tersebut berhubungan dengan tahanan beban, R_L . Jika diberi sinyal *input* positif, maka *transistor* NPN (Q_1) akan aktif dan *transistor* PNP (Q_2) *cut-off*. Begitu juga sebaliknya, jika diberi sinyal *input* negatif, maka *transistor* NPN (Q_1) *cut-off* dan *transistor* PNP (Q_2) aktif. Jadi *transistor* NPN (Q_1) meneruskan sinyal *input* positif dan *transistor* PNP (Q_2) akan meneruskan sinyal *input* negatif, sehingga akan dihasilkan sinyal *output* yang lengkap.

Amplifier kelas B ini juga memiliki kekurangan yaitu waktu melakukan penggabungan dua *transistor* pada tingkat akhir sangat sulit diseimbangkan secara sempurna, sehingga menyebabkan terjadinya cacat penyeberangan pada sinyal keluaran (*crossover distortion*). Gambar sinyal keluaran pada *amplifier* kelas B terlihat pada gambar 2.23



Gambar 2.23 Sinyal Keluaran Amplifier Kelas B

Sumber: Mitchell, F.H., Jr and F.H. Mitchell, Sr. *Introduction To Electronic Design*. 2nd ed. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc. 1992, p. 476

Cacat pada *amplifier* kelas B ini terjadi karena *transistor output* tidak aktif bersama-sama, sehingga menyebabkan terjadinya perbedaan waktu aktif dari kedua *transistor*.

Untuk perhitungan efisiensi dari *amplifier* kelas B adalah sebagai berikut:

$$\% \text{ efisiensi} = 100 \times \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{supply (total)}}$$

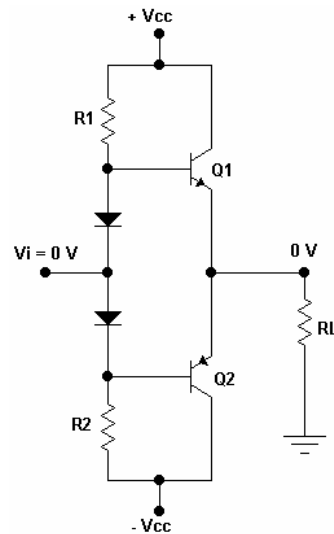
$$\% \text{ efisiensi} = 100 \times \frac{V_p^2 / 2R_L}{2V_p^2 / \pi R_L}$$

$$\% \text{ efisiensi} = 100 \times \frac{\pi}{4}$$

$$\% \text{ efisiensi} = 78,5 \%$$

2.5.3. Amplifier Kelas AB

Dengan adanya cacat keluaran pada *amplifier* kelas B, maka dilakukan penggabungan dua sistem antara *amplifier* kelas A dan *amplifier* kelas B sehingga hasil dari penggabungan ini tergolong dalam *amplifier* kelas AB. Gambar dari rangkaian *amplifier* kelas AB ini dapat dilihat pada gambar 2.24.

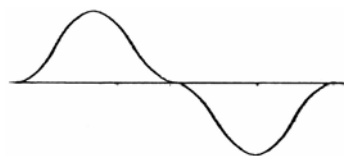


Gambar 2.24. Amplifier Kelas AB

Sumber: Floyd, Thomas L. *Electronic Devices*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc, 1996, p. 385

Penguat daya kelas AB sebenarnya hampir sama dengan penguat kelas B. Cuma pada kelas AB dipasang dioda pada masing-masing basis dari kedua *transistor*. Pemasangan dioda ini akan menghilangkan cacat yang terjadi pada penguat daya kelas B. Karena pada saat tegangan *input*, $V_i = 0$, maka tegangan basis, $V_B = 0,7V$. Maka dari itu pada penguat kelas AB tidak terdapat cacat pada sinyal outputnya seperti pada kelas B.

Amplifier kelas AB ini memiliki keunggulan gabungan dari kelas A dan kelas B. Pada sistem *amplifier* kelas AB ini *transistor* daya aktif terus seperti pada *amplifier* kelas A, tetapi pada arus yang kecil sehingga tidak menimbulkan panas yang berlebihan. Gambar sinyal keluaran pada *amplifier* kelas AB terlihat pada gambar 2.25.



Gambar 2.25. Sinyal Keluaran Amplifier Kelas AB

Sumber: Schuler, Charles A. *Electronics Principles and Applications*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Company. 1984, p.124

Arus ini dibatasi dengan tujuan supaya pasangan *transistor* seperti pada kelas B siap untuk aktif bila ada sinyal yang masuk, sehingga tidak menimbulkan perbedaan waktu aktif pada pasangan *transistor* daya. Dengan menggunakan sistem yang seperti ini cacat keluaran pada kelas B yaitu *crossover distortion* akan hilang dan penguatan sinyal keluaran lebih sempurna.

Secara umum untuk menghitung daya, tegangan dan arus yang dibutuhkan pada *amplifier* kelas B/AB dapat dilihat pada persamaan-persamaan berikut ini:

Daya *output* maksimum:

$$P_{rms} = V_{rms} \times I_{rms}$$

$$P_{rms} = \frac{V_p^2}{2R_L} \quad (2.26)^{26}$$

Untuk arus yang diperlukan:

$$I_{rms} = \frac{I_p}{\sqrt{2}}$$

$$I_{rms} = \frac{V_p}{R_L \times \sqrt{2}} \quad (2.27)^{27}$$

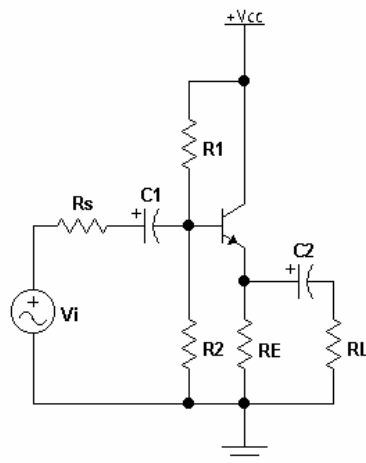
Dalam menunjang perancangan *amplifier* kelas AB ini ada beberapa rangkaian penguat yang dapat digunakan yaitu penguat *common collector*, hubungan *darlington* (*Darlington Pairs*), hubungan komplementer (*Complementary Pairs*), penguatan daya *transistor*.

2.5.3.1. Penguat Common Collector

Dalam merancang rangkaian penguat *common collector* dapat dimulai dari impedansi *input*. Pada rangkaian ekuivalen, R_B paralel dengan rangkaian seri r_π dan impedansi *input* Z_i dilihat dari kanan terminal *emitter-collector*. Gambar dari rangkaian penguat *common collector* dapat dilihat pada gambar 2.26.

²⁶ Floyd, Thomas L. *Electronic Devices*. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall International, Inc, 1996, p. 389

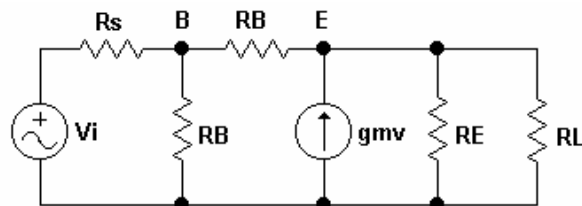
²⁷ *ibid* p. 390



Gambar 2.26. Penguat Common Collector

Sumber: Neudeck, Hayt. *Electronic Circuit Analysis And Design*. California: Houghton Mifflin Company. 1976, p.200

Dan untuk analisa AC penguat *common collector* ini dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian ekivalen AC seperti yang terlihat pada gambar 2.27.



Gambar 2.27. Rangkaian Ekivalen AC

Sumber: Neudeck, Hayt. *Electronic Circuit Analysis And Design*. California:

Houghton Mifflin Company. 1976, p.200

Tahanan beban, $R_L = (R_E \parallel R_L)$

Tegangan, $V = (I_B \times r_\pi)$

Dimana, $gmv = gm \times (r_\pi I_B) = (\beta_0 \times I_B)$

Arus *output*, $I_o = -I_E = [I_B + (\beta_0 \times I_B)]$

Sehingga tegangan, $V_o = (I_o \times R_L)$

$$= [I_B + (\beta_0 \times I_B)] \times R_L$$

$$\text{Bila, } Z_r = \frac{V_o}{I_B} = \frac{[R_L \times (1 + \beta_0)] I_B}{I_B}$$

$$= [(1 + \beta_o) \times R_L]$$

Impedansi *input*:

$$\begin{aligned} Z_i &= \frac{V_i}{I_i} = [R_B \parallel (r_\pi + Z_r)] \\ &= R_B \parallel [r_\pi + (1 + \beta_o)] \times R_L \end{aligned} \quad (2.28)^{28}$$

Tegangan *output*:

$$V_o = \left(\frac{Z_r}{Z_r + r_\pi} \times V_i \right)$$

Penguatan tegangan *input*:

$$A_{v_i} = \frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{Z_r}{Z_r + r_\pi} \right) \quad (2.29)^{29}$$

Penguatan tegangan sumber:

$$A_{v_s} = \frac{V_o}{V_s} = \left(A_{v_i} \times \frac{Z_r}{Z_i + R_B} \right) \quad (2.30)^{30}$$

Penguatan arus:

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{V_o | R_L}{V_s | Z_i} = \left(A_{v_i} \times \frac{Z_i}{R_L} \right) \quad (2.31)^{31}$$

Penguatan daya:

$$\begin{aligned} A_p &= \frac{(V_o \times I_o)}{(V_i \times I_i)} = (A_{v_i} \times A_i) \\ &= A_{v_i}^2 \times \frac{Z_i}{R_L} \end{aligned} \quad (2.32)^{32}$$

Diketahui:

$$I_E = -[(\beta_o + 1) \times I_B]$$

$$V_o = -I_B [r_\pi + (R_B \parallel R_s)]$$

Bila impedansi:

$$Z_L = \frac{V_o}{I_o} = \frac{[r_\pi + (R_B \parallel R_s)]}{(\beta_o + 1)}$$

²⁸ Neudeck, Hayt. *Electronic Circuit Analysis And Design*. California: Houghton Mifflin Company. 1976, p. 200

²⁹ *ibid* p. 201

³⁰ *ibid* p. 201

³¹ *ibid* p. 201

³² *ibid* p. 201

Impedansi *output*:

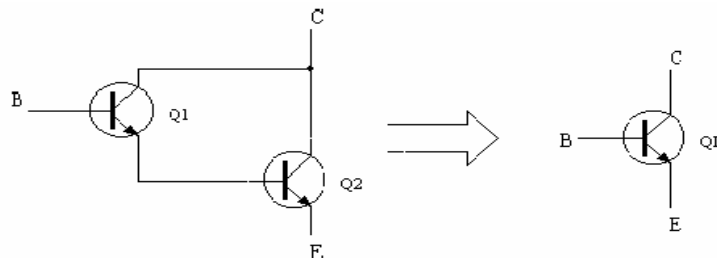
$$\begin{aligned} Z_o &= (R_E \parallel Z_L) \\ &= (R_E \parallel \frac{[r_{\pi} + (R_B \parallel R_S)]}{(\beta_o + 1)}) \end{aligned} \quad (2.33)^{33}$$

Dengan menggunakan persamaan-persamaan di atas tampak jelas bahwa konfigurasi *common collector* mempunyai keunggulan antara lain:

- Impedansi *input* yang tinggi
- Impedansi *output* yang rendah
- Penguatan tegangan ≤ 1
- Penguatan arus sangat besar

2.5.3.2. Hubungan Darlington (Darlington Pairs)

Hubungan *Darlington* adalah hubungan dari dua *Bipolar Junction Transistor* (BJT) untuk beroperasi sebagai satu *transistor*. Gambar dari hubungan Darlington dapat dilihat pada gambar 2.28.



Gambar 2.28. Hubungan Darlington

Sumber: Boylestad, Robert, and Louis Nashelky. *Electronic Devices And Circuit Theory*. 5th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1997, p. 532

Dimana keuntungan dari hubungan *Darlington* adalah untuk meningkatkan penguatan arus pada rangkaian. Penguatan arus dari hubungan Darlington merupakan perkalian dari penguatan arus kedua *transistor*:

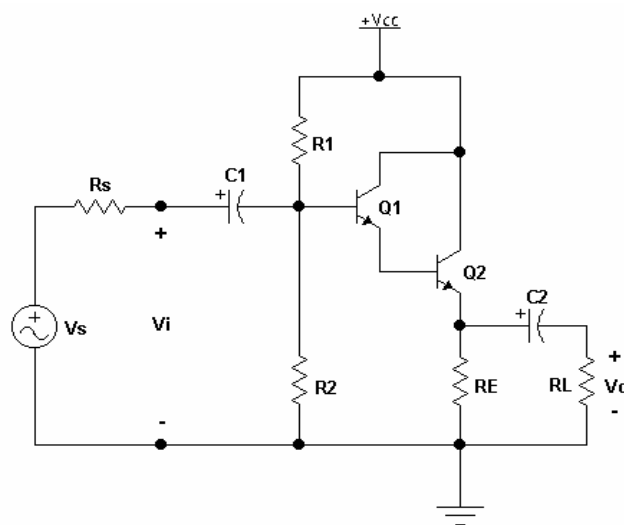
$$\beta_{\text{Darlington}} = \beta_{Q1} \times \beta_{Q2} \quad (2.34)^{34}$$

³³ ibid p. 202

³⁴ Boylestad, Robert, and Louis Nashelky. *Electronic Devices And Circuit Theory*. 5th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1997, p. 533

2.5.3.3. Rangkaian Penguat Darlington

Rangkaian penguat darlington dapat dilihat pada gambar 2.29. Sebenarnya rangkaian ini hampir sama dengan rangkaian penguat *common-collector*, cuma berbeda pada jumlah transistornya saja. Pada rangkaian penguat *common-collector* digunakan satu *transistor*. Sedangkan pada rangkaian penguat darlington *common-collector* digunakan dua *transistor*, sehingga β total adalah hasil perkalian dari β masing-masing *transistor*.



Gambar 2.29. Rangkaian Penguat Darlington

Sumber: Boylestad, Robert, and Louis Nashelky. *Electronic Devices And Circuit Theory*. 5th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1997, p. 534

Analisa DC dari rangkaian di atas adalah :

Arus basis dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta_{Q1}\beta_{Q2}) R_E} \quad (2.35)^{35}$$

Dimana $V_{BE} = 2 \times 0,7 \text{ V}$

Arus pada emitor adalah:

$$I_E = (\beta_{Q1}\beta_{Q2} + 1)I_B \approx (\beta_{Q1}\beta_{Q2})I_B \quad (2.36)^{36}$$

Tegangan pada emitor adalah:

$$V_E = I_E \times R_E \quad (2.37)^{37}$$

³⁵ ibid p. 533

³⁶ ibid p. 533

Maka tegangan basis adalah:

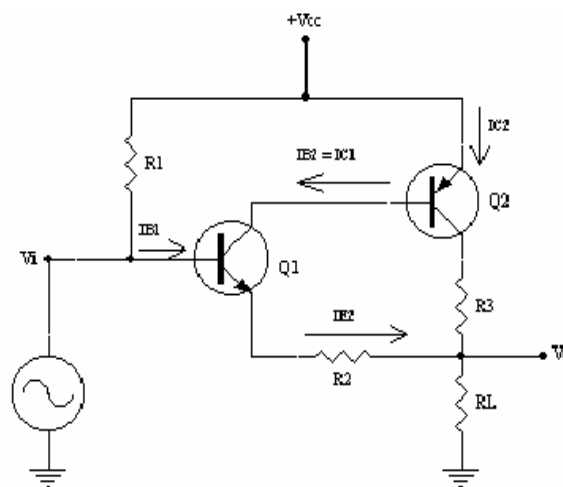
$$V_B = V_E + V_{BE} \quad (2.38)^{38}$$

2.5.3.4. Hubungan Komplementer (Complementary Pairs)

Rangkaian *complementary pairs* sebenarnya hampir sama dengan rangkaian Darlington. Letak perbedaannya adalah pada jenis transistornya. Kalau pada rangkaian Darlington digunakan dua *transistor* yang sejenis, yaitu jenis NPN saja atau PNP saja. Sedangkan pada rangkaian *complementary pairs*, yang satu menggunakan *transistor* jenis NPN dan yang satu lagi menggunakan *transistor* jenis PNP.

2.5.3.5. Rangkaian Penguat Complementary Pairs

Rangkaian dari penguat *complementary pairs* dapat dilihat pada gambar 2.30.



Gambar 2.30. Rangkaian Penguat Complementary Pairs

Sumber: Boylestad, Robert, and Louis Nashelky. *Electronic Devices And Circuit Theory*. 5th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1997, p. 537

³⁷ ibid p. 533

³⁸ ibid p. 533

Arus kolektor I_{C2} dapat diketahui sebagai berikut:

$$I_{C2} = I_{rms} = \frac{V_p}{R_L \sqrt{2}} \quad (2.39)^{39}$$

Arus kolektor pada Q_2 adalah:

$$I_{C2} = (\beta_{DCQ2} \times I_{B2}) \quad (2.40)^{40}$$

Arus kolektor pada Q_1 adalah :

$$I_{C1} = (\beta_{DCQ1} \times I_{B1}) = I_{B2} \quad (2.41)^{41}$$

Sehingga arus beban adalah:

$$I_L = (I_{E1} + I_{C2}) \quad (2.42)^{42}$$

2.5.3.6. Penguatan Daya Transistor

Penguat daya adalah suatu penguat yang mampu menghasilkan daya keluaran yang besar. *Transistor* yang digunakan mempunyai daya disipasi yang besar dan mempunyai resistansi keluaran yang kecil. Penguat daya pada umumnya menggunakan konfigurasi *common collector* karena mempunyai impedansi keluaran yang kecil sehingga dapat diberi beban dengan resistansi yang kecil. Apabila tegangan keluaran besar maka dapat menghasilkan arus keluaran yang besar. Kemampuan penguatan tersebut dibatasi oleh rating daya disipasi *transistor* yang digunakan.

2.6. Total Harmonic Distortion

Sebuah sinyal *sinusoidal* yang murni mempunyai suatu frekuensi di mana tegangannya berubah-ubah antara positif dan negatif. Banyak sinyal-sinyal yang bervariasi melebihi 360° *cycle* ternyata mempunyai distorsi. Suatu *amplifier* yang ideal harus dapat menguatkan suatu sinyal *sinusoidal* yang murni sehingga menghasilkan sinyal yang bentuknya sama dengan *input* tetapi telah mengalami penguatan. Ketika pada sinyal *output* terjadi distorsi maka sinyal itu tidak akan sama lagi bentuknya dengan sinyal *input*.

³⁹ Boylestad, Robert, and Louis Nashelky. *Electronic Devices And Circuit Theory*. 5th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1997, p. 538

⁴⁰ *ibid* p. 538

⁴¹ *ibid* p. 538

⁴² *ibid* p. 538

Distorsi dapat terjadi karena karakteristik dari rangkaian yang tidak linear. Ini dapat terjadi pada semua kelas *amplifier*. Distorsi juga dapat terjadi karena komponen dan respon rangkaian kepada sinyal *input* berbeda pada frekuensi yang berbeda, maka hal ini menjadi distorsi frekuensi.

Suatu sinyal dinyatakan memiliki *harmonic distortion* ketika terdapat komponen frekuensi *harmonic*. Ketika frekuensi *fundamental* memiliki suatu amplitudo (A_1) dan komponen η th frekuensi juga memiliki suatu amplitudo (A_η) maka suatu *harmonic distortion* dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\% \eta \text{th harmonic distortion} = \% D_\eta = \frac{|A_\eta|}{|A_1|} \times 100 \% \quad (2.43)^{43}$$

Ketika sebuah sinyal *output* mempunyai sejumlah komponen individu *harmonic distortion*, maka sinyal itu dapat dinyatakan memiliki suatu total harmonic distortion berdasarkan pada elemen-elemen individu sebagai gabungan dari suatu hubungan dari persamaan berikut:

$$\% \text{THD} = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + D_4^2 + \dots} \times 100 \% \quad (2.44)^{44}$$

⁴³ Boylestad, Robert, and Louis Nashelky. *Electronic Devices And Circuit Theory*. 5th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 1997, p. 694⁴³ ibid p. 695⁴³ ibid p. 695

⁴⁴ ibid p. 695