

PENGARUH BEBAN RESISTIF MENGGUNAKAN FAKTOR PENGALI TERHADAP PENGUATAN FILTER RC FREKUENSI RENDAH ORDE PERTAMA

Winarno¹⁾, Ari Santoso²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya
Jl. Sutorejo No 59, Surabaya 60113, Jawa Timur, Indonesia

²⁾ Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur, Indonesia

E-mail : ¹⁾winarno@ft.um-surabaya.ac.id, ²⁾santoso@ee.its.ac.id

ABSTRAK

Beban resistif yang dipasang pada sisi output circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama mempengaruhi penguatan atau *gain* circuit pada frekuensi *cut off*. Perubahan penguatan circuit diindikasikan oleh perubahan magnitudo dalam *dB*. Perubahan magnitudo sangat signifikan ketika beban resistif dengan nilai resistansi sangat rendah digunakan di circuit. Selain itu menentukan nilai resistansi beban resistif dengan tepat sangat penting karena berpengaruh pada kemampuan circuit untuk mentransfer daya listrik dari input ke output. Paper ini menyajikan perhitungan menggunakan model matematika sederhana dengan faktor pengali nilai resistansi beban resistif untuk mendapatkan penurunan *gain* terendah pada circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama. Simulasi menunjukkan implementasi nilai resistansi beban resistif menggunakan faktor pengali 3 mampu memberikan penurunan *gain* terendah. Dengan nilai resistansi input 3.9Ω maka nilai resistansi beban resistif yang dibutuhkan adalah 3900Ω .

Kata kunci: beban resistif, LPF, gain, frekuensi cut off, faktor pengali

ABSTRACT

Resistive load connected to the output side of first order low pass passive RC filter affects the gain of circuit at the cut off frequency. Gain change of circuit indicated by magnitude change in decibel. Proper resistance value for resistive load is important key related to ability to transfer power from input to output of first order low pass passive RC filter. Lower resistance lowering gain of circuit. This paper presents calculation using simple mathematical model with multiplier for resistive load to achieve lower gain of circuit. Simulation shows the implementation of multiplier by factor of 3 giving lower gain of circuit. Using the circuit input resistance of 3.9Ω so we need the load resistance of 3900Ω .

Keywords: resistive load, LPF, gain, cut off frequency, multiplier

1. PENDAHULUAN

Filter adalah circuit elektronik yang difungsikan untuk meloloskan frekuensi tertentu dan melemahkan atau menolak frekuensi yang

lain. Kapasitor dan induktor di circuit filter berkontribusi menyebabkan penggeseran fasa atau *phase shift* tegangan output dari tegangan input dikenal dengan istilah *lagging* dan *leading*. Selain itu kedua komponen pasif ini mempunyai komponen parasitik didalam strukturnya yang

mampu mempengaruhi *performance* filter. Pengaruh komponen parasitik terhadap *performance* circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama dievaluasi sangat detil di [1]. Rugi daya atau *power losses* dihasilkan karena ada selisih amplitudo arus *charging* dengan menggunakan metode analisis statis. Di penelitian ini pengaruh komponen parasitik di struktur kapasitor elektrolit diabaikan. Pengabaian karena frekuensi yang digunakan sebesar 100 Hz termasuk kategori frekuensi rendah. Jadi pengaruh komponen parasitik di struktur kapasitor elektrolit terhadap *performance* filter tidak signifikan. Komponen parasitik di struktur kapasitor elektrolit harus dipertimbangkan dalam mendesain filter jika frekuensi kerja yang digunakan termasuk kategori frekuensi sangat tinggi [2].

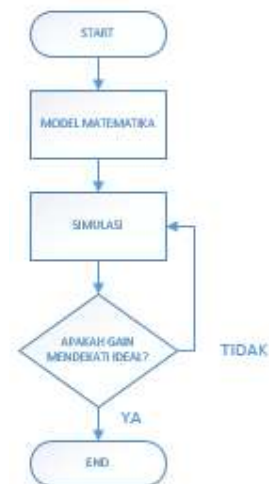
Filter pasif melibatkan hanya komponen elektronik pasif sementara filter aktif melibatkan selain komponen elektronik pasif juga melibatkan komponen elektronik lain sebagai penguat sinyal atau *amplifier* [3]. *Operational amplifier* adalah salah satu komponen elektronik yang difungsikan sebagai penguat sinyal input atau tegangan input. Selain itu transistor juga mempunyai kemampuan menguatkan sinyal input. Filter dikelompokkan dalam *low pass filter (LPF)*, *high pass filter (HPF)*, *band pass filter (BPF)*, *band stop filter (BSF)*. Implementasi filter di circuit tertentu bekerja dengan frekuensi radio (*RF filter*) [4].

Filter menemukan implementasi di circuit komunikasi *wireless* [4], *power konverter* [5], *radar* di sistem kontrol *autonomous vehicle* [6] dan lain – lain. Di *radar*, salah satu modul di sistem kontrol *autonomous vehicle* , umumnya digunakan filter jenis *LPF* [7]. Filter ini diletakkan setelah sub block *mixer*. Filter RC frekuensi rendah orde pertama adalah salah satu filter paling sederhana. Filter ini disusun dari kombinasi komponen elektronik pasif resistor dan kapasitor yang disambung secara seri dan termasuk *low pass filter (LPF)*, gambar 2 (a). Pada sisi kiri circuit adalah tegangan input V_{in} dan pada sisi kanan circuit adalah tegangan output V_{out} . Filter ini difungsikan untuk menguatkan sinyal atau tegangan input V_{in}

dengan frekuensi dibawah frekuensi *cut off* dan melemahkan sinyal atau tegangan input V_{in} dengan frekuensi diatas frekuensi *cut off* [4]. Ada dua zona kerja di filter ini yaitu zona dimana frekuensi diloloskan disebut *passband* dan zona dimana frekuensi dilemahkan atau ditolak disebut *stopband*. Frekuensi *cut off* atau frekuensi *corner* adalah frekuensi yang terletak pada zona transisi antara *pass band* dan *stop band*. Filter RC frekuensi rendah orde pertama mengalami penurunan *gain* sebesar -3 dB pada frekuensi *cut off*. Penurunan *gain* berlanjut mengikuti kenaikan frekuensi kerja circuit sebesar -20 dB per decade [4]. Penurunan *gain* sebesar -3 dB adalah penurunan *gain* untuk filter ideal dan hanya ada di teori [4]. Untuk circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama *phase shift* yang terjadi adalah -45° [4]. Tujuan dari penelitian ini adalah mengusulkan metode paling sederhana yang dapat digunakan untuk menentukan nilai resistansi beban resistif di circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama. Analisis statis dan dinamis dilakukan di penelitian ini.

2. METODE PENELITIAN

Gambar 1 menunjukkan *flowchart* penelitian di paper ini.

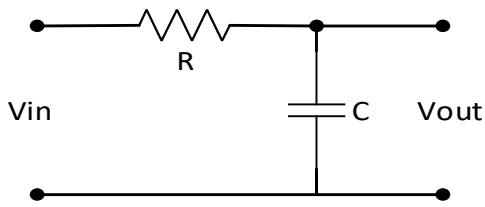


Gambar 1 *flowchart* penelitian

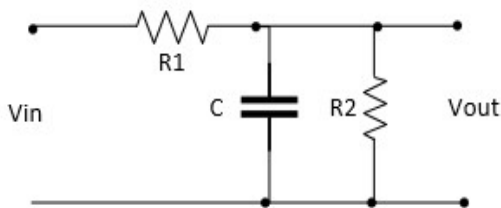
Tahap pertama dimulai dengan membuat model matematika berdasar circuit yang dibuat. Di tahap ini fungsi transfer circuit dihasilkan

menggunakan metode Laplace. Banyaknya faktor pengali n yang digunakan ada ditahap ini. Simulasi direalisasi menggunakan bahasa pemrograman Matlab setelah pembuatan model matematika. Analisis menggunakan *bode plot* dilakukan untuk mendapatkan *error* terkecil dari *plot* yang dihasilkan. Dengan membandingkan antara *plot* tanpa beban resistif dan dengan beban resistif menggunakan faktor pengali kita dapatkan nilai n yang dapat digunakan untuk menentukan besar nilai resistansi beban resistif yang dibutuhkan. Di tahap ini proses dilakukan sebanyak nilai n yang kita tentukan.

Gambar 2 (a) menunjukkan komponen elektronik pasif resistor R dan kapasitor elektrolit C dikonfigurasi membentuk circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama. Kedua komponen elektronik pasif ini dihubungkan secara seri dan impedansi input circuit merupakan penjumlahan antara resistansi resistor R dan reaktansi kapasitif kapasitor elektrolit C . Gambar 2 (b) menunjukkan modifikasi circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama dengan memasang beban resistif R_2 pada sisi output circuit. Komponen elektronik pasif R_2 membentuk sambungan paralel dengan kapasitor elektrolit C . Tegangan output V_{out} adalah tegangan pada beban resistif R_2 .



(a)



(b)

Gambar 2 (a) filter tanpa beban resistif R_2

(b) filter dengan beban resistif R_2

Konversi Laplace untuk kedua komponen elektronik pasif resistor R dan kapasitor elektrolit C kita dapatkan

$$R = R \dots \dots \dots (1)$$

$$C = \frac{1}{sC} \dots \dots \dots (2)$$

Menggunakan hukum II Kirchoff kita dapatkan persamaan sebagai berikut

$$V_{in(s)} = V_{R(s)} + V_{C(s)} \dots \dots \dots (3)$$

dimana

$$V_{in(s)} = \text{tegangan input satuan volt}$$

$$V_{R(s)} = \text{tegangan pada resistor satuan volt}$$

$$V_{C(s)} = \text{tegangan pada kapasitor satuan volt}$$

Dengan mensubstitusi persamaan (1) dan persamaan (2) ke persamaan (3) kita dapatkan persamaan sebagai berikut

$$V_{in(s)} = I_{(s)}R + I_{(s)}\frac{1}{sC} \dots \dots \dots (4)$$

atau

$$V_{in(s)} = I_{(s)}\left(R + \frac{1}{sC}\right)$$

dan

$$V_{out(s)} = I_{(s)}\frac{1}{sC} \dots \dots \dots (5)$$

atau

$$I_{(s)} = sCV_{out(s)}$$

Dengan mensubstitusi persamaan (5) ke persamaan (4) kita dapatkan persamaan sebagai berikut

$$V_{in(s)} = sCV_{out(s)}R + V_{out(s)}$$

dan rasio tegangan output $V_{out(s)}$ terhadap tegangan input $V_{in(s)}$ kita dapatkan persamaan sebagai berikut

$$V_{in(s)} = V_{out(s)}(sCR + 1)$$

$$\frac{V_{out(s)}}{V_{in(s)}} = \frac{1}{sCR + 1} \dots \dots \dots (6)$$

Persamaan untuk tegangan output $V_{out(s)}$

$$V_{out(s)} = V_{in(s)} \left(\frac{1}{sCR + 1} \right)$$

Persamaan (6) adalah fungsi transfer dari tegangan output V_{out} ke tegangan input V_{in} untuk filter RC tanpa beban resistif R_2 . Menggunakan cara yang sama kita dapatkan fungsi transfer dari tegangan output V_{out} ke tegangan input V_{in} untuk filter RC dengan beban resistif R_2 sebagai berikut

$$\frac{V_{out(s)}}{V_{in(s)}} = \frac{R_2}{sCR_1R_2 + R_1 + R_2} \dots \dots \dots (7)$$

Kita dapatkan persamaan tegangan output $V_{out(s)}$

$$V_{out(s)} = V_{in(s)} \left(\frac{R_2}{sCR_1R_2 + R_1 + R_2} \right)$$

Merujuk ke persamaan (6) dan persamaan (7) kita membuat rasio R_1 terhadap R_2 untuk mendapatkan penurunan *gain*

$$r = \frac{R_1}{R_2} \dots \dots \dots (8)$$

dimana r adalah rasio R_1 terhadap R_2

r adalah konstanta tanpa satuan. Kita mengusulkan persamaan rasio r dengan faktor pengali menggunakan bilangan basis 10 atau bilangan logaritma

$$r = \frac{1}{10^n} \dots \dots \dots (9)$$

dimana

n adalah faktor pengali

$n = 1, 2, \dots n$ untuk penurunan *gain* terkecil

$n = -1, -2, \dots -n$ untuk penurunan *gain* terbesar

Di penelitian ini kita menggunakan faktor pengali $n = 6$ dan kita menentuka nilai

$n = -3, -2, -1, 1, 2, 3.$

Parameter yang digunakan di penelitian ini ditunjukkan oleh tabel 1. Frekuensi resonansi dipilih sebesar 100 Hz atau sekitar 628.318 rad/sec .

Tabel 1 parameter yang digunakan

Parameter	Nilai	Satuan
Resistor 1	3.9	Ω
Kapasitor	470	μF
Frekuensi	100	Hz

3. HASIL DAN DISKUSI

Merujuk ke persamaan (8) dan persamaan (9) kita dapatkan nilai resistansi beban resistif R_2 dengan 6 faktor pengali.

Tabel 2 menunjukkan nilai resistansi beban resistif R_2 dengan 6 faktor pengali

Tabel 2 nilai resistansi R_2 dengan 6 faktor pengali

n	nilai resistansi R_2	satuan
1	39	Ω
2	390	Ω
3	3900	Ω
-1	0.39	Ω
-2	0.039	Ω
-3	0.0039	Ω

Hasil perhitungan nilai resistansi R_2 dengan 6 faktor pengali kita dapatkan nilai resistansi beban resistif R_2 terendah sebesar 0.0039 Ω pada $n = -3$ dan nilai resistansi beban resistif tertinggi sebesar 3900 Ω pada $n = 3$. Merujuk ke persamaan (6) dan persamaan (7) kita dapatkan fungsi transfer tegangan output V_{out} ke tegangan input V_{in} untuk filter RC.

Menggunakan parameter di tabel 1 dan tabel 2 kita dapatkan fungsi transfer sebagai berikut

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{545.5537}{s + 545.5537}$$

Fungsi transfer diatas adalah fungsi transfer dari tegangan output V_{out} ke tegangan input V_{in} untuk filter RC tanpa beban resistif R_2 . Fungsi transfer ini dijadikan sebagai referensi untuk fungsi transfer yang lain

Fungsi transfer dibawah adalah fungsi transfer dari tegangan output V_{out} ke tegangan input V_{in} untuk filter RC dengan beban resistif R_2 .

Untuk nilai resistansi beban resistif $R_2 = 39 \Omega$ kita dapatkan fungsi transfer sebagai berikut

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{545.5537}{s + 600.1091}$$

Untuk nilai resistansi beban resistif $R_2 = 390 \Omega$ kita dapatkan fungsi transfer sebagai berikut

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{545.5537}{s + 551.0093}$$

Untuk nilai resistansi beban resistif $R_2 = 3900 \Omega$ kita dapatkan fungsi transfer sebagai berikut

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{545.5537}{s + 546.0993}$$

Untuk nilai resistansi beban resistif $R_2 = 0.39 \Omega$ kita dapatkan fungsi transfer sebagai berikut

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{545.5537}{s + 6001.1}$$

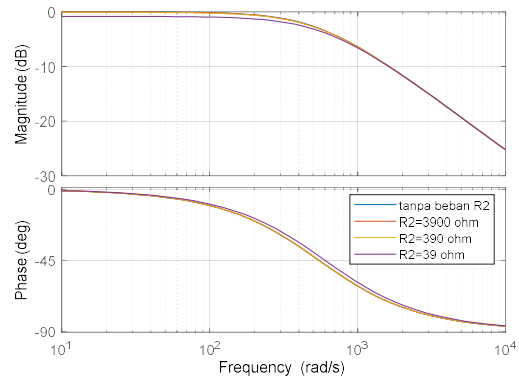
Untuk nilai resistansi beban resistif $R_2 = 0.039 \Omega$ kita dapatkan fungsi transfer

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{545.5537}{s + 55100.9}$$

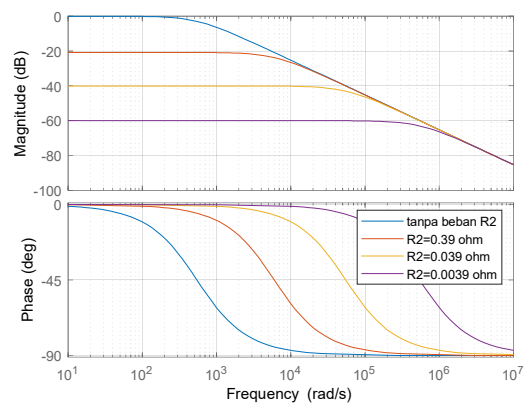
Untuk nilai resistansi beban resistif $R_2 = 0.0039 \Omega$ kita dapatkan fungsi transfer

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{545.5537}{s + 546099.3}$$

Analisis statis diselenggarakan menggunakan metode *bode plot* untuk menentukan nilai penurunan *gain*, perubahan frekuensi *cut off*, *phase shift*, dan gradien. Gambar 3 (a) dan (b) menunjukkan grafik fungsi frekuensi circuit filter RC menggunakan metode *bode plot* masing – masing untuk n positif dan n negatif. Frekuensi di satuan *radian per second* pada sumbu X. Magnitudo di satuan *dB* pada sumbu Y.



(a)



(b)

Gambar 3 (a) penurunan *gain* untuk n positif

(b) penurunan *gain* untuk n negatif

Gambar 3 (a) menunjukkan penurunan *gain* untuk n positif. Penurunan *gain* circuit filter RC tanpa beban resistif R_2 terjadi tepat ketika grafik memotong pada -45^0 . Dengan menarik garis vertikal keatas kita dapatkan penurunan *gain* sebesar -3.01 dB . Grafik ini berimpit dengan grafik yang dihasilkan oleh circuit filter RC dengan beban resistif sebesar 3900Ω . Dengan teknik *zoom* terdapat selisih magnitudo antara

dua grafik tersebut. Kita dapatkan selisih magnitudo Δ sebesar

$$\Delta = -3.02 - (-3.01) = -0.01 \text{ dB}$$

Frekuensi *cut off*, penggeseran fasa, dan gradien yang terjadi antara dua grafik ini besarnya sama masing – masing 546 rad/sec , -45° dan -20 dB/decade . Dengan selisih magnitudo sangat kecil ini berarti agar circuit filter RC dengan beban resistif R_2 mampu mentransfer daya listrik dari input ke output secara maksimum maka nilai resistansi beban resistif R_2 adalah 1000 kali lebih besar dari resistansi input circuit R_1 . Semakin kecil selisih magnitudo yang dihasilkan maka nilai resistansi beban resistif R_2 semakin tepat. Merujuk ke persamaan (8) dan persamaan (9), faktor pengali n yang digunakan adalah variabel bebas dan dipilih sedemikian hingga nilai magnitudo, frekuensi *cut off*, dan *phase shift* mendekati atau sama dengan magnitudo, frekuensi *cut off*, dan *phase shift* circuit filter RC tanpa beban resistif R_2 . Gambar 3 (b) menunjukkan penurunan *gain* untuk n negatif. Beban resistif 0.0039Ω memberikan penurunan *gain* tertinggi sebesar -63 dB . Dengan teknik *zoom* terdapat selisih magnitudo antara grafik dengan beban resistif 0.0039Ω dan grafik tanpa beban resistif. Kita dapatkan selisih magnitudo Δ sebesar

$$\Delta = -63 \text{ dB} - (-3.01 \text{ dB}) = -59.99 \text{ dB}$$

Penurunan *gain* -59.99 dB sangat signifikan. Selain itu beban resistif 0.0039Ω juga menaikkan frekuensi *cut off* pada -45° sebesar 546000 rad/sec . Selisih frekuensi *cut off* Δ yang dihasilkan antara circuit dengan beban resistif 0.0039Ω dan circuit tanpa beban resistif sebesar

$$\Delta = 546000 - 546 = 545454 \text{ rad/sec}$$

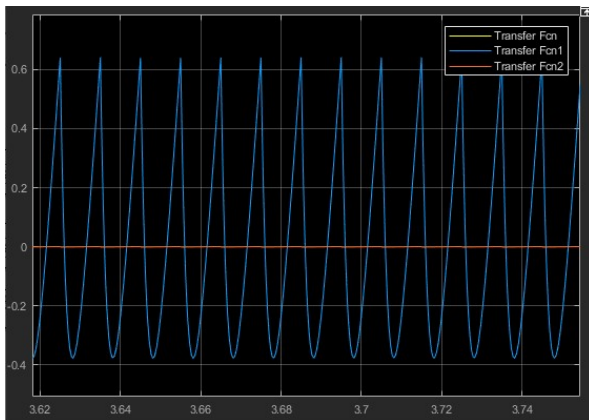
Dengan selisih frekuensi *cut off* yang signifikan ini berarti kapasitor elektrolit C di circuit filter RC dengan beban resistif R_2 bekerja dengan frekuensi sangat tinggi dibandingkan dengan kapasitor elektrolit C di circuit filter RC tanpa beban resistif R_2 . Di kondisi ini nilai reaktansi

kapasitif kapasitor elektrolit C pada sisi output circuit menjadi sangat kecil yang berkontribusi menurunkan tegangan output V_{out} . Penurunan tegangan output V_{out} yang diakibatkan oleh penurunan reaktansi kapasitif kapasitor elektrolit C sangat signifikan jika dibandingkan dengan penurunan tegangan output V_{out} circuit filter RC tanpa beban resistif R_2 . Tabel 3 menunjukkan penurunan tegangan output V_{out} oleh nilai resistansi beban resistif R_2 .

Tabel 3 penurunan tegangan output V_{out}

beban (Ω)	magnitudo (dB)	penurunan tegangan V_{out} (%)
3900	-3.02	50.06
390	-3.10	50.51
39	-3.84	54.56
0.39	-23.80	95.44
0.039	-43.10	99.51
0.0039	-63	99.95

Penurunan tegangan output V_{out} oleh nilai resistansi beban resistif 0.0039Ω mendekati 100% . Dikondisi ini kapasitor elektrolit C seperti dihubung singkat atau *short circuited*. Analisis dinamis diselenggarakan menggunakan sinyal input dengan frekuensi sebesar 100 Hz . Tiga fungsi transfer masing – masing fungsi transfer tanpa beban resistif, 3900Ω , dan 0.0039Ω digunakan untuk validasi penurunan tegangan output V_{out} . Kita menggunakan tiga fungsi transfer sebagai perwakilan fungsi transfer yang lain untuk mendapatkan gambar sinyal output yang mudah dianalisis. Gambar 4 menunjukkan validasi tiga nilai resistansi 3900Ω , 0.0039Ω , dan tanpa beban resistif. Magnitudo nilai resistansi beban resistif 3900Ω berimpit dengan magnitudo tanpa beban resistif. Magnitudo nilai resistansi beban resistif 0.0039Ω *flat* atau datar pada nilai terendah 0, ditunjukkan oleh grafik warna merah. Nilai puncak grafik sekitar 0.637 dan nilai terendah grafik sekitar -0.373 .



Gambar 4 validasi nilai resistansi

Tabel 4 menunjukkan perubahan magnitudo dan frekuensi *cut off* disebabkan oleh perubahan nilai resistansi beban resistif R_2 .

Table 4 perubahan magnitudo dan frekuensi *cut off*

beban (Ω)	magnitudo (dB)	frekuensi (rad/sec)	fasa ($^\circ$)	gradien (dB/decade)
tanpa beban	-3.01	546	-45	-20
3900	-3.02	546	-45	-20
390	-3.10	551	-45	-20
39	-3.84	600	-45	-20
0.39	-23.80	6000	-45	-20
0.039	-43.10	55100	-45	-20
0.0039	-63	546000	-45	-20

Semakin besar nilai resistansi beban resistif R_2 nilai magnitudonya mendekati nilai magnitudo circuit filter RC tanpa beban resistif R_2 dengan frekuensi *cut off* dan *phase shift* yang sama. Semakin kecil nilai resistansi beban resistif R_2 maka nilai magnitudonya mengalami penurunan dan frekuensi *cut off* mengalami kenaikan dibanding nilai magnitudo dan frekuensi *cut off* circuit filter RC tanpa beban resistif R_2 . Gradien yang dihasilkan oleh enam nilai resistansi yang berbeda semuanya sama sebesar -20 dB/decade .

KESIMPULAN DAN SARAN

Pemilihan beban resistif R_2 yang akan dipasang pada sisi output circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama harus dilakukan dengan selektif. Selektifitas dibutuhkan karena beban resistif berpengaruh ke *gain* dan frekuensi *cut off*. Simulasi menunjukkan implementasi nilai resistansi beban resistif R_2 menggunakan faktor pengali 3 atau 1000 kali lebih besar dari nilai resistansi input R_1 mampu menghasilkan penurunan *gain* terendah dengan frekuensi *cut off* dan *phase shift* yang sama dengan circuit filter RC frekuensi rendah orde pertama tanpa beban resistif. Menggunakan nilai resistansi input sebesar 3.9Ω maka kita butuh nilai resistansi beban resistif sebesar 3900Ω .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Winarno and A. Santoso, "Pengaruh Komponen Parasitik ESR Terhadap Amplitudo Arus Charging Dan Disipasi Thermal Kapasitor Elektrolit," *E-Link J. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 20, no. 1, pp. 53–59, 2025, doi: 10.30587/e-link.v20i1.9632.
- [2] H. S. H. Chung, W. T. Yan, and A. K. T. Sung, "Active cancellation of capacitor ESR and ESL effects for improving converter transient and steady-state response," *2009 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2009*, pp. 723–730, 2009, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316443.
- [3] D. Xu and J. Ren, "Study of parasitic capacitance effect on low pass CMOS active filters," *IEEE Int. Symp. Semicond. Manuf. Conf. Proc.*, vol. 2, pp. 992–995, 2003, doi: 10.1109/ICASIC.2003.1277378.
- [4] L. Syed, S. H. Hasan, H. Rashid, and W. Gulistan, "Designing band pass filter for HF radio's front end," *2019 Int. Conf. Commun. Technol. ComTech 2019*, no. ComTech, pp. 60–64, 2019, doi:

10.1109/COMTECH.2019.8737794.

- [5] P. A. Dahono, “A control method to damp oscillation in the input LC filter of AC-DC PWM converters,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 4, pp. 1630–1635, 2002.
- [6] A. Manjunath, Y. Liu, B. Henriques, and A. Engstle, “Radar Based Object Detection and Tracking for Autonomous Driving,” *2018 IEEE MTT-S Int. Conf. Microwaves Intell. Mobility, ICMIM 2018*, no. Icmim, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/ICMIM.2018.8443497.
- [7] W. Winkler and J. Borngräber, “Receiver front-end MMIC for low-cost 24 GHz radar systems,” *2nd Microw. Radar Week Pol. - Int. Radar Symp. IRS 2006, Proc.*, no. 0, pp. 3–6, 2006, doi: 10.1109/IRS.2006.4338021.