

Analisis kinerja penguat BJT common-emitter dengan kapasitor kopling dan kapasitor bypass

Muhammad Mundzir Mubarak^{1*)}, Kasiyanto², Mokhammad Syafaat³

^{1,2,3}Program Elektronika Sistem Senjata, Politeknik Angkatan Darat, Batu, Indonesia

*Penulis Korespondensi, e-mail: mundzird4elka9@gmail.com

Received: 16/12/2025

Revised: 20/04/2026

Accepted: 20/04/2026

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji respons frekuensi, titik operasi, dan penguatan mid-band dari penguat transistor BJT common-emitter BC547, beserta pengaruh kapasitor kopling (C1, C3) dan kapasitor bypass (C2). Proses ini menggunakan komputasi teoretis, simulasi Proteus, dan data eksperimental. Dengan $V_{CC} = 15\text{ V}$ dan $V_{in} = 10\text{ mV}$ (puncak), semuanya dijalankan. Temuan penting meliputi penguatan mid-band A_v sebesar 11,3 kali (21,0 dB), frekuensi cutoff yang berkurang menjadi 90 Hz untuk F1 (seperti yang diukur di laboratorium), 1 kHz untuk F2, dan 450 kHz untuk F3 (seperti yang diukur di laboratorium). Alasan mengapa teori, simulasi, dan pengujian tidak selalu sesuai adalah karena toleransi komponen, kapasitansi parasitik transistor, dan ESR kapasitor. Temuan ini menyoroti fungsi penting kapasitor kopling pada F1 dan C2 untuk meningkatkan A_v sambil mempertahankan stabilitas bias DC.

Kata Kunci: BJT, Common-Emitter, Kapasitor Bypass, Kapasitor Kopling, Penguat Sinyal

ABSTRACT

The frequency response, operating point, and mid-band gain of a BC547 common-emitter transistor BJT amplifier are examined in this research, along with the effects of coupling capacitors (C1, C3) and bypass capacitor (C2). This process made use of theoretical computations, Proteus simulations, and experimental data. With $V_{CC} = 15\text{ V}$ and $V_{in} = 10\text{ mV}$ (peak), everything was executed. Important findings include a mid-band gain A_v of 11.3 times (21.0 dB), a reduced cut-off frequency of 90 Hz for F1 (as measured in the lab), 1 kHz for F2, and 450 kHz for F3 (as measured in the lab). Why theory, simulations, and tests don't always agree is due to component tolerances, parasitic capacitances of transistors, and capacitor ESR. The findings highlight the crucial function of coupling capacitors in F1 and C2 for enhancing A_v while maintaining DC bias stability.

Keywords: BJT, Common-Emitter, Coupling Capacitor, Bypass Capacitor, Signal Amplifier

1. PENDAHULUAN

Penguat transistor bipolar dengan tata letak common-emitter (CE) adalah topologi yang banyak digunakan dalam rangkaian analog. Desain rangkaian yang sederhana memungkinkan penguatan tegangan tinggi pada frekuensi mid-band dalam desain ini [1, 2, 3]. Desain topografi ini sering digunakan dalam penguat sinyal audio, tahap pra-penguat, dan sistem instrumentasi analog [4] [5].

Komponen pasif dan faktor bias DC, terutama kapasitor dan resistor, memiliki dampak signifikan pada kinerja rangkaian keluaran, masukan, dan pemancar dari penguat co-important [6] [7]. Meskipun menurunkan penguatan sinyal AC, resistor co-important memainkan peran penting dalam menstabilkan titik operasi terhadap perubahan suhu dan variasi penguatan arus transistor (β) [8] [9]. Merupakan praktik standar untuk menggunakan kapasitor bypass secara paralel dengan resistor co-important untuk mengatasi hal ini. Dengan cara ini, fungsi stabilisasi DC dapat dipertahankan sementara sinyal AC dapat melewatinya [10] [11].



Kapasitor kopling di kedua ujung rangkaian memblokir koefisien DC agar tidak melewatinya, memastikan bahwa hanya sinyal AC yang mencapai tahap selanjutnya. Frekuensi cutoff bawah ditentukan oleh nilai kapasitor kopling ini, yang pada gilirannya memengaruhi respons frekuensi tingginya [12], [13] [14]. Dengan menggabungkan kapasitor kopling dengan kapasitor bypass, penguat pembatas kopling dapat meniru penguat band-pass [2] [15].

Penelitian tentang kapasitor pasif dan pengaruhnya pada rangkaian penguat BJT terbatas, dengan sebagian besar studi berfokus pada karakteristik bias DC atau kapasitor bypass pada penguat [10], [16]. Beberapa studi bahkan mengabaikan kapasitor sepenuhnya. Hanya sedikit studi yang meneliti respons frekuensi lengkap (F1, F2, dan F3) dan efek gabungan kapasitor kopling dan bypass padanya, atau membandingkan teori dengan simulasi [17] [18].

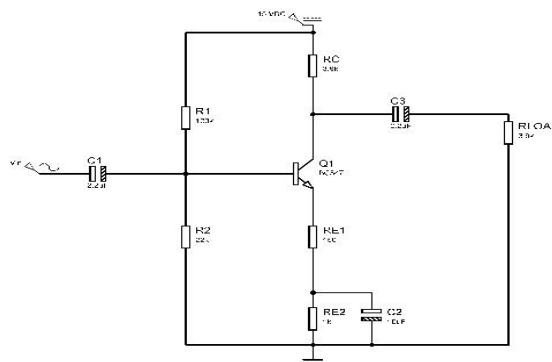
Oleh karena itu, Di antara tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) menentukan titik kerja DC dan penguatan tegangan pada frekuensi mid-band; (2) mengukur titik respons frekuensi penguat, termasuk frekuensi cutoff bawah (F1), frekuensi cutoff atas (F2), dan frekuensi cutoff atas (F3); dan (3) memahami perbedaan antara hasil eksperimental dan teoritis.

2. METODE PENELITIAN

Bagian ini merinci langkah-langkah yang digunakan untuk membuat rangkaian penguat BJT generik yang menjadi dasar penelitian ini. Penyusunan skema, penentuan nilai komponen, menganalisis fungsinya, melakukan perhitungan teoretis, menjalankan simulasi Proteus, dan memverifikasi desain di laboratorium.

2.1 Perancangan Rangkaian

1. Gambar Skematik.



Gambar 1. Skematik penguat BJT Common-Emitter menggunakan transistor BC547

2. Tabel Nilai Komponen

TABEL I: Nilai komponen rangkaian penguat BJT Common-Emitter

No	Komponen	Simbol	Nilai
1	Resistor pembagi basis atas	R1	100 kΩ
2	Resistor pembagi basis bawah	R2	22 kΩ
3	Resistor kolektor	RC	3.9 kΩ
4	Resistor emitor atas	RE 1	150 Ω
5	Resistor emitor bawah	RE 2	1 kΩ
6	Kapasitor kopling input	C1	2.2 µF
7	Kapasitor bypass emitor	C2	10 µF
8	Kapasitor kopling output	C3	2.2 µF
9	Beban output	RLO AD	3.9 kΩ
10	Catu daya DC	VCC	15 V DC
11	Transistor	Q1	BC547 (NPN)

2.2 Perhitungan Teoritis



Perhitungan teoritis mencakup bias DC, parameter sinyal kecil, penguatan mid-band, impedansi input, serta penentuan frekuensi-frekuensi kritis F1, F2, dan F3.

1. Perhitungan Tegangan Bias Basis (VB)

$$V_B = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 15 \cdot \frac{22k}{100k + 22k} = 2.7049 \text{ V} \quad (1)$$

2. Perhitungan Tegangan Emitor (VE)

$$V_E = V_B - V_{BE} = 2.7049 - 0.7 = 2.0049 \text{ V} \quad (2)$$

3. Perhitungan Arus Emitor (IE)

$$R_{E(\text{total})} = R_{E1} + R_{E2} = 150 + 1000 = 1150 \ \Omega \quad (3)$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_{E(\text{total})}} = \frac{2.0049}{1150} = 0.001743 \text{ A} = 1.74 \text{ mA} \quad (4)$$

4. Perhitungan Tegangan Kolektor (VC)

$$I_C \approx I_E = 1.74 \text{ mA} \quad (5)$$

$$V_C = V_{CC} - (I_C \cdot R_C) = 15 - (0.00174 \times 3900) = 8.214 \text{ V} \quad (6)$$

5. Perhitungan Tegangan Kolektor-Emitor (VCE)

$$V_{CE} = V_C - V_E = 8.21 - 2.00 = 6.21 \text{ V} \quad (7)$$

6. Resistansi Dinamis Emitor (r_e)

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E} = \frac{0.026}{0.00174} = 14.94 \ \Omega \quad (8)$$

7. Penguatan Tegangan AC (A_v)

Pertama menghitung RC || RL:

$$R_C \parallel R_L = \frac{3.9k \times 3.9k}{3.9k + 3.9k} = 1.95k \ \Omega \quad (9)$$

$$A_v = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{E1}} = -\frac{1950}{14.94 + 150} = -11.82 \quad (10)$$

8. Penguatan dalam Desibel

$$A_v(\text{dB}) = 20 \log(11.82) = 21.45 \text{ dB} \quad (11)$$

9. Impedansi Input (R_{in})

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = \frac{100k \times 22k}{122k} = 18.03k \ \Omega \quad (12)$$

$$\beta(r_e + R_{E1}) = 200(14.94 + 150) = 32988 \ \Omega$$

$$R_{in} = R_B \parallel 32988 = 11.65k \ \Omega$$

10. Frekuensi Cut-Off Bawah (F1)

a. Pengaruh C1 (Input)

$$f_{c,\text{in}} = \frac{1}{2\pi R_{in} C_1} = \frac{1}{2\pi(11.65k)(2.2\mu\text{F})} = 6.2 \text{ Hz} \quad (13)$$

b. Pengaruh C2 (Bypass)

$$f_{\text{bypass}} = \frac{1}{2\pi R_{E2} C_2} = \frac{1}{2\pi(1k)(10\mu\text{F})} = 15.9 \text{ Hz}$$

c. Pengaruh C3 (Output)

$$R_{\text{eq,out}} = 1.95k \ \Omega$$

$$f_{c,\text{out}} = \frac{1}{2\pi R_{\text{eq,out}} C_3} = \frac{1}{2\pi(1.95k)(2.2\mu\text{F})} = 37.1 \text{ Hz}$$

d. Penentu F1

$$F_1 = \max(f_{c,\text{in}}, f_{\text{bypass}}, f_{c,\text{out}}) \quad (14)$$

$$F_1 = 37.1 \text{ Hz}$$

11. Frekuensi Mid-Band (F2).

F2 dipilih pada frekuensi di mana gain stabil.

$$F_2 = 1 \text{ kHz}$$

12. Frekuensi Cut-Off Atas (F3)

a. Pole Input (C_π + Efek Miller)

$$C_{in} = C_\pi + C_\mu(1 + |A_v|) \quad (15)$$

$$C_{in} = 30\text{pF} + 4\text{pF}(12.82) = 81.28\text{pF}$$

$$f_{H,\text{in}} = \frac{1}{2\pi R_{\text{sig}} C_{in}} = 39 \text{ MHz}$$

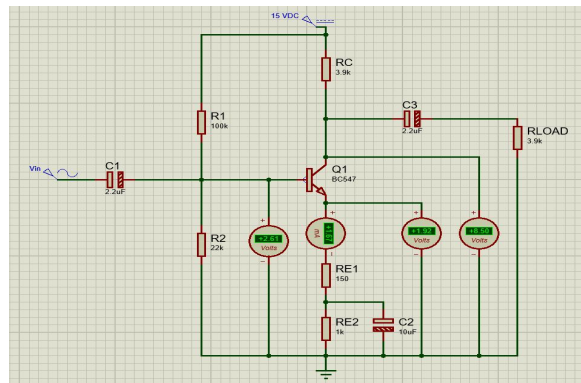


- b. Pole Output
 $R_{out} = 3.9k \parallel 3.9k = 1950 \Omega$
 $f_{H,out} = \frac{1}{2\pi(1950)(4pF)} = 20.4 \text{ MHz}$
- c. Penentu F3
 $F_3 = \min(f_{H,in}, f_{H,out}) = 20 \text{ MHz}$

2.3 Simulasi Rangkaian

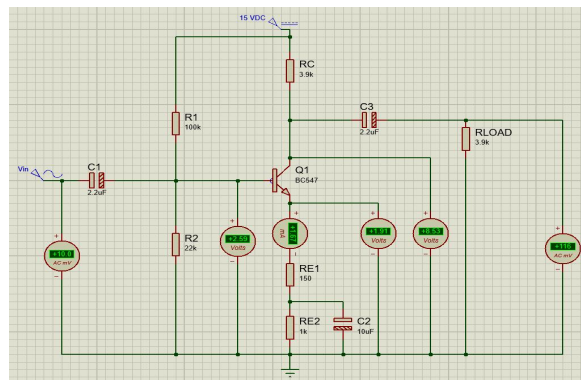
Dengan menggunakan perangkat lunak Proteus, simulasi rangkaian dilakukan untuk mengetahui karakteristik kinerja penguat BJT common-emitter pada kondisi DC dan AC. Simulasi ini mencakup analisis titik kerja DC (titik kerja DC), penguatan mid-band (A_v), dan respon frekuensi (F_1 , F_2 , dan F_3).

1. Pengukuran DC Simulasi. Simulasi DC dilakukan untuk memastikan transistor berada pada daerah aktif.



Gambar 2. Pengukuran DC di Proteus Professional 8.15.

2. Pengukuran Penguatan AC. Penguatan (A_v) dihitung pada frekuensi 1 kHz, yaitu bagian tengah band di mana pengaruh bypass dan kapasitor kopling tidak signifikan.



Gambar 3. Pengukuran Penguatan AC di Proteus Professional 8.15.

3. Penentuan Frekuensi F_1 , F_2 , dan F_3 pada Simulasi. Untuk melakukan pengamatan respon frekuensi, frekuensi input dinaikkan secara bertahap dari 1 Hz hingga 20 MHz. Nilai frekuensi cut-off dihitung berdasarkan penurunan gain sebesar -3 dB dari $A_{v,max}$:

$$0.707 \times A_{v,max} = 0.707 \times 11.6 = 8.2012$$

TABEL II : Hasil Sweep Frekuensi.

Frekuensi (Hz)	Vin (mV)	Vout (mV)	$A_v = Vout/Vin$	Keterangan
----------------	----------	-----------	------------------	------------

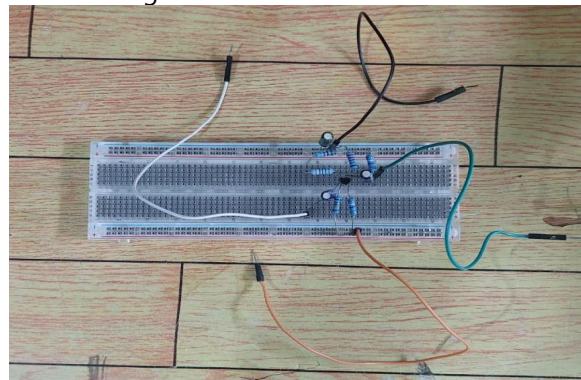


Frekuensi (Hz)	Vin (mV)	Vout (mV)	Av = Vout/Vin	Keterangan
1	10	0.4	0.04	Sinyal sangat kecil, kapasitor kopling belum efektif
110	10	82	8.2	Titik -3 dB (F1)
1.000	10	116	11.6	Awal daerah mid-band
17.800.000	10	82	8.2	Titik -3 dB (F3)

2.4 Pengujian dan Pengukuran di Laboratorium

Laboratorium mengevaluasi rangkaian penguat BJT Coimmoin-Eimitteir (CEi) yang dibangun secara fisik. Selama pengujian, metrik utama yang dinilai adalah titik operasi DC, penguatan tegangan (A_v), dan batasan pita frekuensi rendah (F1), menengah (F2), dan tinggi (F3).

1. Alat dan Bahan.
 - a. Breadboard
 - b. Multimeter digital
 - c. Osiloskop
 - d. Function generator (signal generator)
2. Perakitan Perangkat Keras. Papan sirkuit digunakan untuk perakitan rangkaian, seperti yang ditunjukkan pada diagram desain bagian 2.1.



Gambar 4. Rangkaian Penguat BJT Common-Emitter pada Breadboard

3. Pengukuran Titik Operasi DC 3. Tegangan pada titik basis, emitor, dan kumparan diukur ketika sumber daya 15 V diatur. Jika kita membagi tegangan V_E dengan resistansi emitor, kita mendapatkan arus emitor.

TABEL III ... Hasil Pengujian DC.

Parameter	Hasil Pengukuran
V_B	2.48 V
V_E	1.98 V
V_C	8.24 V
$V_{CE} (V_C - V_E)$	6.26 V
I_E	1.76 mA

Berdasarkan hasil pengujian, transistor berada di area aktif, sehingga tepat untuk memberikan sinyal AC guna mengukur penguatan.

4. Potensial Penguatan Terakumulasi (A_v). Sinyal sinusoidal dengan amplitudo 10 mV (puncak) dan frekuensi 1 kHz dihasilkan oleh osilator dan digunakan untuk menguji penguatan. V_{in} dan V_{out} diukur menggunakan mikroskop optik.



TABEL IV : Hasil Pengujian Penguatan (Av).

Vin (mV)	Vout (mV)	Av	Av (dB)
10	112.8	11.28	21.04

Validasi pertama ini telah berhasil diselesaikan karena hasil pengukuran menunjukkan bahwa penguatan pita tengah rangkaian fisik sangat mendekati nilai simulasi (11,6×).

5. Pengujian Respons Frekuensi F1, F2, dan F3. Dengan amplitudo Vin = 10 mV, frekuensi input dinaikkan secara bertahap dari 1 Hz hingga 20 MHz. Gain Av ditentukan dengan membagi Vout dengan Vin. Ambang batas -3 dB dihitung menggunakan:

$$A_{v,-3dB} = 0.707 \times A_{v,max} \approx 0.707 \times 11.28 = 7.98$$

TABEL V : Hasil Pengujian Frekuensi.

Frekuensi (Hz)	Vin (mV)	Vout (mV)	Av = Vout/Vin	Keterangan
90	10	79.8	7.98	Mendekati batas -3 dB (F1)
1000	10	112.8	112.8	Awal daerah mid-band, penguatan mulai stabil
100.000	10	116	11.6	Mid-band, penguatan maksimum (Av_max)
450.000	10	80	8.0	Mendekati batas -3 dB (F3)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Membandingkan Titik Operasi DC. Untuk memverifikasi bahwa transistor mampu berfungsi sebagai penguat untuk sinyal AC, pengujian dilakukan pada titik kerja DC-nya. Data dari laboratorium, simulasi, dan teori semuanya disajikan dalam tabel berikut untuk Anda periksa.

TABEL VI . Perbandingan Titik Kerja DC.

Parameter	Teori	Simulasi	Laboratorium	Selisih (Lab vs Sim)	Error (%)
VB	2.70 V	2.61 V	2.48 V	-0.13 V	8.15 %
VE	2.00 V	1.57 V	1.98 V	+0.41 V	1.00 %
VC	8.21 V	8.50 V	8.24 V	-0.26 V	0.37 %
IE	1.74 mA	1.92 mA	1.76 mA	-0.16 mA	1.15 %
VCE	6.21 V	6.93 V	6.26 V	-0.67 V	0.08 %

Deviasi standar antara tegangan basis teoritis (VB) dan nilai terukur di laboratorium adalah sekitar ±0,2 V, yang dapat dikelola karena toleransi resistor yang digunakan untuk membagi tegangan. Dibandingkan dengan nilai teoritis dan yang diamati (≈2,0 V), tegangan emitor yang disimulasikan (1,57 V) tampak lebih rendah, meskipun arus emitor yang terukur (1,76 mA) cukup dekat dengan nilai teoritis (1,74 mA).

Menurut tujuan desain rangkaian penguat, karakteristik ini menunjukkan bahwa transistor bekerja di area aktif.

Untuk memperkuat analisis, dilakukan perhitungan error menggunakan persamaan:

$$\text{Error (\%)} = \frac{|\text{Nilai eksperimen} - \text{Nilai teori}|}{\text{Nilai teori}} \times 100\% \quad (16)$$

Dengan kesalahan di bawah 2% untuk semua parameter kecuali tegangan basis (VB), ini menunjukkan bahwa analisis teoretis dapat secara akurat memprediksi titik operasi DC. Hal ini terutama berlaku untuk VE, VC, dan IE. Karena dampak toleransi resistor pembagi tegangan dan perubahan sifat transistor, perbedaan ini masih dapat ditoleransi.



Rangkaian ini ideal untuk digunakan sebagai penguat sinyal karena nilai VCE terukur sebesar 6,26 V menunjukkan bahwa transistor bekerja di area aktif ($V_{CE} \gg 0,2$ V).

Secara kuantitatif, ada sejumlah alasan yang kurang ideal yang menjelaskan perbedaan antara temuan simulasi dan data laboratorium, seperti:

- a. Toleransi resistor ($\pm 5\%$)
 - b. Variasi nilai β transistor BC547 (sekitar 140–220)
 - c. Resistansi kontak pada breadboard yang menambah efek parasitik
 - d. Model simulasi Proteus yang belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi nyata
2. Perbandingan Penguatan di Pita Tengah (A_v). Pengukuran penguatan dilakukan pada 1 kHz, yang berada di dalam area pita tengah di mana efisiensi kapasitor dapat diabaikan.

TABEL VII . Perbandingan A_v .

Parameter	Teori	Simulasi	Laboratorium	Error (%)
A_v (lineiar)	11.82x	11.6x	11.28x	4.57 %
A_v (dB)	21.45 dB	21.28 dB	21.04 dB	1.91 %

Analisis:

Nilai penguatan tegangan yang dihitung menggunakan tiga pendekatan berbeda menunjukkan kesesuaian yang cukup baik, menurut temuan yang diukur. Dalam desibel, perbedaannya hanya 1,91%, sedangkan dalam hal ketidakakuratan, nilai A_v pengukuran laboratorium sebesar 11,28 hanya berbeda 4,57% dari nilai teoritis sebesar 11,82.

Teknik model sinyal kecil secara akurat memprediksi penguatan di area pita tengah, seperti yang terlihat dari perbedaan ini.

Dibandingkan dengan hasil eksperimen, nilai teoritis dari penguatan yang disimulasikan agak lebih akurat. Hal ini terjadi karena simulasi didasarkan pada representasi komponen yang lebih ideal daripada yang sebenarnya ada di dunia nyata.

Beberapa variabel yang kurang ideal berkontribusi pada penurunan nilai penguatan yang ditunjukkan dalam data laboratorium, seperti:

- a. Resistansi kontak pada breadboard
- b. Toleransi nilai resistor dan kapasitor
- c. Pengaruh kapasitansi parasitik rangkaian
- d. Adanya noise pada sinyal pengukuran

Secara umum, area pita tengah menunjukkan fluktuasi penguatan yang sangat kecil ($<5\%$), yang mengindikasikan bahwa penguat beroperasi sesuai harapan.

3. (F_1 , F_2 , F_3) Respons Frekuensi Penguat. Kemampuan penguat untuk membawa sinyal melintasi rentang frekuensi tertentu ditunjukkan oleh respons frekuensinya. Frekuensi batas atas (F_3), frekuensi tengah (F_2), dan frekuensi batas bawah (F_1) adalah karakteristik yang diperiksa.

TABEL VIII . Perbandingan F_1 , F_2 , F_3 .

Parameter	Teori	Simulasi	Laboratorium
F_1	37.1 Hz	110 Hz	90 Hz
F_2	1 kHz	1 kHz	1 kHz
F_3	≈ 20 MHz	17.8 MHz	≈ 450 kHz

Tiga parameter utama—frekuensi cutoff bawah (F_1), frekuensi mid-band (F_2), dan frekuensi cutoff atas (F_3)—digunakan untuk menganalisis respons frekuensi penguat BJT common-emitter. Teori, simulasi Proteus, dan data eksperimental semuanya berperan dalam perbandingan ketiga parameter tersebut.



a. Frekuensi Cut-Off Bawah (F_1).

Nilai F_1 secara teoritis diperoleh sebesar 37.1 Hz, sedangkan hasil simulasi menunjukkan nilai sebesar 110 Hz dan hasil pengukuran laboratorium sebesar 90 Hz.

Secara kuantitatif, deviasi antara hasil simulasi dan teori adalah:

$$\frac{110-37.1}{37.1} \approx 196\% \quad (17)$$

Sedangkan deviasi antara hasil laboratorium dan teori adalah:

$$\frac{90-37.1}{37.1} \approx 142\%$$

Perbedaan antara nilai teoritis, simulasi, dan eksperimen disebabkan oleh beberapa faktor non-ideal, antara lain:

- 1) toleransi kapasitor elektrolit yang cukup besar ($\pm 20\%$),
- 2) resistansi seri (ESR) kapasitor,
- 3) variasi impedansi input akibat parameter transistor,
- 4) serta adanya kapasitansi dan resistansi parasitik pada breadboard.

b. Frekuensi Mid-Band (F_2)

Hasil dari laboratorium, simulasi, dan teori semuanya sesuai pada 1 kHz. Di sini, efek komponen reaktif dapat diabaikan karena kapasitor kopling (C_1 dan C_3) dan kapasitor bypass (C_2) semuanya berfungsi optimal.

Dengan demikian, penguatan mencapai puncak dan kemudian stabil, menunjukkan bahwa penguat beroperasi di area pita tengah, seperti yang lazim terjadi pada penguat emitor umum.

c. Frekuensi Cut-Off Atas (F_3)

Hasil simulasi menunjukkan bahwa frekuensi cut-off atas (F_3) tercapai pada sekitar 17.8 MHz, yaitu saat penguatan turun hingga mendekati $0.707 \times A_{v_max}$ (≈ 8.15). Nilai ini cukup mendekati hasil teoritis sebesar ± 20 MHz.

Namun, hasil pengukuran laboratorium menunjukkan nilai F_3 yang jauh lebih rendah, yaitu sekitar 450 kHz. Secara kuantitatif, deviasi antara hasil simulasi dan laboratorium adalah:

$$\frac{17.8 \text{ MHz} - 0.45 \text{ MHz}}{17.8 \text{ MHz}} \approx 97.5\%$$

Perbedaan yang signifikan ini disebabkan oleh berbagai faktor non-ideal, antara lain:

- 1) kapasitansi parasitik pada breadboard ($\pm 5-30$ pF),
- 2) kapasitansi probe osiloskop (sekitar 20 pF),
- 3) keterbatasan bandwidth alat ukur (osiloskop dan function generator),
- 4) efek Miller yang memperbesar kapasitansi antara basis dan kolektor,
- 5) serta noise dan distorsi yang muncul pada frekuensi tinggi.

Dengan demikian, perbedaan F_3 antara simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa pengaruh kapasitansi parasitik dan keterbatasan alat ukur sangat dominan pada frekuensi tinggi.

d. Kesimpulan Respon Frekuensi

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa respon frekuensi penguat mengikuti karakteristik band-pass, yaitu penguatan meningkat pada frekuensi rendah (F_1), stabil pada daerah mid-band (F_2), dan menurun pada frekuensi tinggi (F_3).

Namun, deviasi yang signifikan pada F_3 menunjukkan bahwa faktor non-ideal seperti kapasitansi parasitik dan keterbatasan alat ukur sangat mempengaruhi kinerja penguat pada frekuensi tinggi.

4. Perhitungan Bandwidth (BW)

Bandwidth merupakan rentang frekuensi kerja penguat yang dibatasi oleh frekuensi cut-off bawah (F_1) dan frekuensi cut-off atas (F_3). Secara umum, bandwidth dapat dihitung menggunakan persamaan:



$$BW = F_3 - F_1 \tag{18}$$

TABEL XIII . Ringkasan Bandwidth

Metode	F1	F3	Bandwidth
Teori	37.1 Hz	20 MHz	≈ 20 MHz
Simulasi	110 Hz	17.8 MHz	≈ 17.8 MHz
Laboratorium	90 Hz	450 kHz	≈ 449.9 kHz

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa bandwidth hasil simulasi (≈ 17.8 MHz) mendekati nilai teoritis (≈ 20 MHz), dengan deviasi sebesar:

$$\frac{20 - 17.8}{20} \approx 11\%$$

Sebaliknya, bandwidth hasil pengukuran laboratorium jauh lebih kecil dibandingkan teori. Deviasi bandwidth laboratorium terhadap teori dapat dihitung sebagai:

$$\frac{20 \text{ MHz} - 0.45 \text{ MHz}}{20 \text{ MHz}} \approx 97.75\%$$

Perbedaan ini menunjukkan bahwa elemen non-ideal sangat memengaruhi bandwidth penguat dalam implementasi dunia nyata, yang tidak sepenuhnya dipertimbangkan dalam studi teoritis atau simulasi.

Penyempitan bandwidth dalam temuan laboratorium dapat disebabkan oleh banyak variabel utama, termasuk:

- a. Kapasitansi parasitik pada breadboard dan jalur rangkaian
- b. Kapasitansi probe osiloskop yang membebani rangkaian
- c. Keterbatasan bandwidth alat ukur (osiloskop dan function generator)
- d. Efek Miller yang memperbesar kapasitansi input pada frekuensi tinggi
- e. Adanya noise dan distorsi sinyal

Akibatnya, penguatan mulai menurun pada frekuensi yang lebih tinggi, yang menurunkan nilai F_3 dan secara langsung membatasi bandwidth penguat.

Secara teori, penguat dapat menangani sinyal selebar puluhan MHz. Efek dari komponen yang kurang ideal dan kondisi pengukuran menyebabkan bandwidth menjadi jauh lebih sempit (sekitar 450 kHz) dalam aplikasi dunia nyata.

Hasil dari laboratorium lebih mencerminkan keadaan sebenarnya dari rangkaian, sedangkan hasil dari analisis teoritis dan simulasi lebih cenderung memberikan hasil yang sempurna.

5. Analisis Noise dan Stabilitas Penguat

Selain parameter penguatan dan respon frekuensi, kinerja penguat BJT common-emitter juga dipengaruhi oleh noise dan stabilitas rangkaian. Kedua aspek ini menjadi penting terutama pada penguatan sinyal kecil (low-level signal) dan pada frekuensi tinggi.

a. Analisis Noise

Noise pada penguat BJT umumnya berasal dari beberapa sumber utama, yaitu:

- 1) Thermal noise (Johnson noise) pada resistor
- 2) Shot noise pada junction basis-emitor
- 3) Flicker noise (1/f noise) pada frekuensi rendah
- 4) Noise eksternal dari lingkungan dan alat ukur

Secara matematis, thermal noise pada resistor dapat dinyatakan sebagai:

$$v_n = \sqrt{4kTRB} \tag{19}$$

dengan:

k = konstanta Boltzmann (1.38×10^{-23})

T = suhu absolut (K)

R = resistansi (Ω)



B = bandwidth (Hz)

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa noise berbanding lurus dengan bandwidth. Hal ini sesuai dengan hasil pengukuran, di mana pada frekuensi tinggi (mendekati F_3), sinyal keluaran mulai mengalami distorsi dan fluktuasi akibat meningkatnya kontribusi noise.

Pada pengujian laboratorium, noise terlihat dalam bentuk:

- 1) Ketidakstabilan amplitudo sinyal pada osiloskop
- 2) Distorsi gelombang pada frekuensi tinggi
- 3) Penurunan rasio signal-to-noise (SNR)

Selain itu, penggunaan breadboard meningkatkan noise karena adanya:

- 1) Kapasitansi parasitik antar jalur
- 2) Induktansi kecil pada kabel jumper
- 3) Kontak yang tidak ideal"

b. Analisis Stabilitas Penguat

Stabilitas penguat adalah ukuran kemampuannya untuk menahan gangguan lingkungan termasuk fluktuasi suhu, variasi komponen, dan kebisingan sambil mempertahankan kondisi operasional (bias DC dan penguatan).

Resistor emitor (R_E) yang menghasilkan umpan balik negatif menjaga rangkaian ini tetap stabil. Salah satu cara untuk menyatakan penguatan secara matematis adalah sebagai berikut:

$$A_v = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{E1}}$$

Keberadaan R_{E1} menyebabkan penguatan menjadi lebih stabil terhadap perubahan parameter transistor, khususnya variasi β .

Selain itu, kapasitor bypass (C_2) berperan penting dalam:

- 1) Meningkatkan penguatan AC
- 2) Tetap mempertahankan stabilitas DC

Namun, pada frekuensi tinggi, stabilitas mulai menurun akibat:

- 1) Efek Miller, yang memperbesar kapasitansi input:
 $C_{in} = C_{\pi} + C_{\mu}(1 + |A_v|)$
- 2) Pergeseran fasa (phase shift) yang dapat memicu kecenderungan osilasi
- 3) Penurunan margin stabilitas akibat elemen reaktif

c. Keterkaitan Noise, Stabilitas, dan Hasil Eksperimen

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada daerah mid-band ($F_2 = 1$ kHz), penguat bekerja stabil dengan penguatan maksimum dan noise yang relatif kecil.

Namun, pada frekuensi tinggi (mendekati F_3):

- 1) Penguatan mulai menurun
- 2) Noise meningkat
- 3) Sinyal mengalami distorsi"

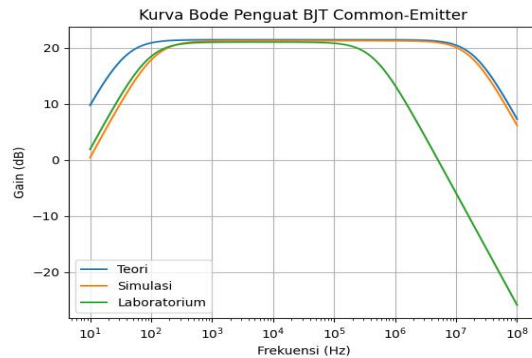
Efek frekuensi tinggi teoritis bukanlah satu-satunya penyebab keterbatasan bandwidth lebih banyak noise dan sirkuit yang kurang stabil juga menjadi penyebabnya.

Resistor emitor bertindak sebagai umpan balik negatif, memungkinkan penguat BJT emitor umum untuk mempertahankan stabilitas yang sangat baik di area mid-band untuk sebagian besar waktu. Di sisi lain, efek parasit dan peningkatan noise mengurangi stabilitas kinerja penguat pada frekuensi tinggi.

Oleh karena itu, untuk mencapai kinerja terbaik, desain penguat harus mempertimbangkan trade-off antara gain, bandwidth, noise, dan stabilitas.

6. Grafik Perbandingan Respon Frekuensi.





Gambar 5. Kurva Bode (Gain vs Frekuensi) penguat BJT common-emitter berdasarkan hasil teori, simulasi, dan laboratorium.

Kurva Bode yang menggambarkan hubungan gain-frekuensi pada penguat BJT emitor umum ditunjukkan pada Gambar 10. Tren umum muncul dari kurva teoritis, komputasional, dan eksperimental: gain meningkat pada frekuensi rendah, stabil di pita tengah, dan kemudian turun tajam pada frekuensi tinggi.

4. KESIMPULAN

Berikut adalah temuan dari rangkaian penguat BJT konfigurasi emitor umum menggunakan transistor BC547, yang diperoleh dari perhitungan teoretis, simulasi Proteus, dan pengujian laboratorium:

a. Titik kerja (operating point) berada pada daerah aktif dan relatif stabil.

Nilai tegangan V_B , V_E , V_C , "serta arus emitor dari hasil teori, simulasi, dan pengukuran menunjukkan kesesuaian yang baik dengan error relatif kecil ($< 10\%$). Hal ini menunjukkan bahwa konfigurasi pembagi tegangan (R1–R2) dan resistor emitor (RE1–RE2) mampu menstabilkan bias DC sehingga transistor bekerja optimal sebagai penguat.

b. Penguatan mid-band (A_v) sesuai dengan perancangan dan tervalidasi dengan baik.

Nilai penguatan hasil teori sebesar $11.82\times$, simulasi $11.6\times$, dan hasil laboratorium $11.28\times$ dengan error sekitar 4.57% . Dalam satuan desibel, perbedaannya hanya sekitar 1.91% . Hal ini membuktikan bahwa model sinyal kecil (small-signal model) cukup akurat dalam memprediksi penguatan pada daerah mid-band.

c. Frekuensi cut-off bawah (F1) dipengaruhi oleh kapasitor kopling dan bypass serta toleransi komponen.

Nilai F1 hasil teori sebesar 37.1 Hz, simulasi 110 Hz, dan laboratorium 90 Hz. Deviasi ini disebabkan oleh toleransi kapasitor elektrolit, nilai ESR, serta variasi impedansi input transistor, yang menyebabkan pergeseran titik -3 dB pada frekuensi rendah.

d. Frekuensi cut-off atas (F3) menunjukkan deviasi paling signifikan akibat efek non-ideal.

Nilai F3 teoritis sekitar 20 MHz dan simulasi 17.8 MHz, sedangkan hasil laboratorium hanya sekitar 450 kHz. Penurunan signifikan ini disebabkan oleh kapasitansi parasitik, efek Miller, serta keterbatasan bandwidth alat ukur, yang mempercepat penurunan penguatan pada frekuensi tinggi.

e. Bandwidth penguat sangat dipengaruhi oleh kondisi implementasi nyata.

Bandwidth teoritis dan simulasi berada pada orde MHz, sedangkan hasil laboratorium hanya sekitar 450 kHz. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun secara desain penguat memiliki bandwidth lebar, pada implementasi nyata bandwidth menjadi terbatas akibat faktor parasitik dan noise.

f. Noise dan stabilitas mempengaruhi kinerja terutama pada frekuensi tinggi.

Penguat menunjukkan performa stabil pada daerah mid-band, namun pada frekuensi tinggi terjadi peningkatan noise dan distorsi sinyal. Hal ini berkaitan dengan efek kapasitif, penurunan margin stabilitas, serta pengaruh lingkungan dan alat ukur.

g. Secara keseluruhan, karakteristik respon frekuensi sesuai dengan teori penguat common-emitter.



Ketiga pendekatan (teori, simulasi, dan eksperimen) menunjukkan pola yang konsisten, yaitu penguatan meningkat pada frekuensi rendah, stabil pada mid-band, dan menurun pada frekuensi tinggi. Hal ini menegaskan bahwa model teoritis valid, namun implementasi nyata dipengaruhi oleh faktor non-ideal."

5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Elektronika Politeknik Angkatan Darat serta seluruh pihak yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. C. Sedra, Adel S. Smith, *Microelectronic Circuits*. Oxford: Oxford University Press, 2015. doi: 10.1093/oso/9780199339136.001.0001.
- [2] L. Boylestad, Robert L. Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory*. Pearson Education, 2016. doi: 10.1109/9780470544077.
- [3] S. Kasiyanto, Aripriharta, "Optimizing IoT Data Transmission with the Queen Honey Bee Migration Method for Operational Efficiency of the Hostage Rescue Team," vol. 11, no. 3, pp. 5094–5104, 2025, doi: 10.22399/ijcesen.3280.
- [4] W. Horowitz, Paul Hill, *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 2015. doi: 10.1017/CBO9780511818889.
- [5] M. A. Wijaya, A. Boedi, and J. Saputra, "Instrumentasi Elektronis terhadap Pengukuran Kecepatan dan Arah Angin Berbasis Arduino Nano," pp. 146–151.
- [6] M. H. Rashid, *Microelectronic Circuits: Analysis and Design*. Cengage Learning, 2017. doi: 10.1201/9781315117411.
- [7] Kasiyanto, "Pengaruh Kompetensi dan Kompensasi Terhadap Kinerja Dimediasi Oleh Motivasi Kerja Pada Tenaga Pendidik Politeknik Angkatan Darat," vol. 20, no. 1, pp. 38–47, 2019.
- [8] S. Franco, *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*. McGraw-Hill, 2015. doi: 10.1036/0073380399.
- [9] R. S. Akbar, F. Kholid, D. Widiatmoko, and A. Achmad, "Design of Fuel Monitoring Application for Reservoir Tanks in Army Fuel Supply Point on Military Logistics Corps Based on Internet of Things," vol. 3, no. 1, pp. 19–32, 2024, doi: 10.30812/IJECSA.v3i1.3737.
- [10] D. N. B, R. V. Yuliantari, and W. Warindi, *A Practical Design of Common Emitter Amplifier with Swamping Resistance*, vol. 1, no. 2. Atlantis Press International BV, 2023. doi: 10.2991/978-94-6463-078-7.
- [11] M. Lutfiyanto, "DIAGNOSA PROBLEM PERANGKAT SERVER METODE ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)".
- [12] A. Motayed and S. N. Mohammad, "Tuned performance of small-signal BJT Darlington pair," vol. 45, pp. 369–371, 2001.
- [13] B. Razavi, *Fundamentals of Microelectronics*. Wiley, 2017. doi: 10.1002/9781119297509.
- [14] M. C. B. Kasiyanto, Aripriharta, Dekki Widiatmoko, Dodo Irmanto, "Hostage Liberation Operations Using Wheeled Robots Based on LIDAR (Light Detection and Ranging) Sensors," vol. 23, no. 2, pp. 243–258, 2024, doi: 10.30812/matrik.v23i2.3493.
- [15] R. A. Nugroho *et al.*, "SISTEM KONTROL PADA DRONE UNDERWATER BERBASIS," vol. 3, pp. 53–61, 2022.
- [16] S. et al. Mahmud, "Analysis of Emitter Bypass Capacitor Effects on BJT Amplifier Performance," *Int. J. Electron.*, vol. 105, no. 9, pp. 1–16, 2018, doi: 10.1080/00207217.2018.1425957.
- [17] J. M. Campos-salazar, J. L. Aguayo-lazcano, R. Rafiezadeh, and G. García-rojas, "Bipolar Junction Transistor Amplifiers State- Space Modeling Across Frequencies," 2024, doi: 10.7251/ELSxxxxxxx.
- [18] P. Article, A. Danu, and L. Maajid, "RCWS Control System Design Based on Raspberry," vol. 1, no. 1, pp. 12–25, 2021.

