

## Gain Minimum untuk Menjaga Stabilitas *Non-inverting Amplifier Op Amp* yang Berbeban Kapasitif

F. Dalu Setiaji

Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Satya Wacana, Salatiga  
 Email: fds\_ftje@yahoo.com

### Abstrak

*Non-inverting amplifier* merupakan salah satu konfigurasi dasar *amplifier* berbasis *op amp*. Pada *amplifier* ini, hasil perkalian antara *close loop gain* pada frekuensi nol ( $A_{DC}$ ) dengan *bandwidth* (BW) akan bernilai konstan yaitu sebesar *unity-gain frequency* ( $f_t$ ) *op amp* yang dipakai. Sebuah beban kapasitif pada *non-inverting amplifier* bersama hambatan keluaran *op amp* ( $R_o$ ) akan menciptakan satu kutub (*pole*) tambahan ( $f_p$ ) yang memodifikasi respon frekuensi *amplifier*. Apabila  $f_p$  lebih kecil daripada  $f_t$  maka *amplifier* dapat menjadi tidak stabil, yang ditunjukkan dengan adanya *overshoot* pada *step response* keluaran. Salah satu acuan yang dipakai menyatakan bahwa *amplifier* akan mencapai kestabilan bila dipenuhi nilai  $A_{DC}$  minimal ( $A_{DCmin}$ ) sebesar  $10.(f_t/f_p)$ . Makalah ini menjelaskan bahwa kita dapat memilih  $A_{DC}$  yang jauh lebih kecil dibandingkan  $10.(f_t/f_p)$  dengan tetap mempertahankan kestabilan relatif *non-inverting amplifier*. Kesimpulan ini didukung oleh hasil simulasi perangkat-lunak dan pengujian *amplifier* secara riil.

**Kata kunci:** *Non-inverting amplifier*, beban kapasitif, kestabilan, *gain* minimum.

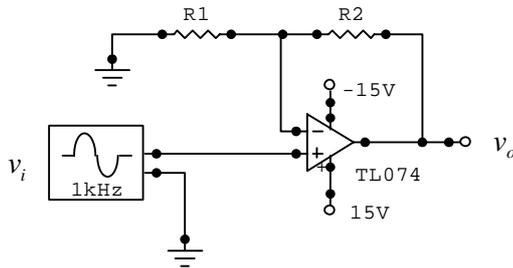
### Abstract

*Non-inverting amplifier* is one of the two basic operational amplifier (*op amp*) circuits. In this type of amplifier product between *close loop gain* at zero hertz ( $A_{DC}$ ) and *bandwidth* (BW) will be constant and equal to *unity-gain frequency* ( $f_t$ ). A capacitive load ( $C_L$ ) together with *op amp* output resistance ( $R_o$ ) will create a new pole at frequency  $f_p$ , thus modifying frequency response of the amplifier. If  $f_t$  greater than  $f_p$ , a *non-inverting amplifier* might become unstable by having a high overshoot on its *step response*. One of the references used in this paper stated that the amplifier will be stable if  $A_{DC}$  equal or greater than  $10.(f_t/f_p)$ . This paper explains that we can choose  $A_{DC}$  much lower than  $10.(f_t/f_p)$  while maintaining a relatively stable *non-inverting amplifier*. This conclusion agrees with simulation and measurement results.

**Keywords:** *Non-inverting amplifier*, capacitive load, stability, minimum gain.

### Respon Frekuensi *Non-inverting Amplifier*

Berikut ini adalah rangkaian *non-inverting amplifier* menggunakan *op amp* TL 074.



Gambar 1. *Non-inverting amplifier* dengan TL 074

*Op amp* TL 074 telah terkompensasi secara internal sehingga *gain* internalnya ( $A$ ) dapat didekati dengan *transfer function* : [1]

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_b}} \quad (1)$$

Dengan pendekatan tersebut maka *close loop gain* ( $A_{cl}$ ) rangkaian Gambar 1 adalah :

$$A_{cl}(s) = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1 + R_2/R_1}{1 + \frac{1}{A_0} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + \frac{s}{\omega_t (1 + R_2/R_1)}} \quad (2)$$

di mana :

$A_0$  = gain *op amp* pada frekuensi nol

$\omega_b = 2\pi f_b$  = open loop frequency cutoff

$\omega_t = 2\pi f_t \approx A_0 \cdot \omega_b$  = unity – gain frequency

Karena  $A_0$  jauh lebih besar dibandingkan  $\{1 + (R_2/R_1)\}$  maka :

**Catatan:** Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juni 2005. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Elektro volume 5, nomor 2, September 2005.

$$A_{cl}(s) \approx \frac{1 + R_2 / R_1}{1 + \frac{s}{\omega_t} (1 + R_2 / R_1)} \quad (3)$$

$$A_{cl}(s) \approx \frac{A_{DC}}{1 + \frac{s}{BW}}$$

$A_{DC}$  = bati frekuensi nol non-inverting amplifier =  $1 + (R_2 / R_1) = \beta^{-1}$

di mana :

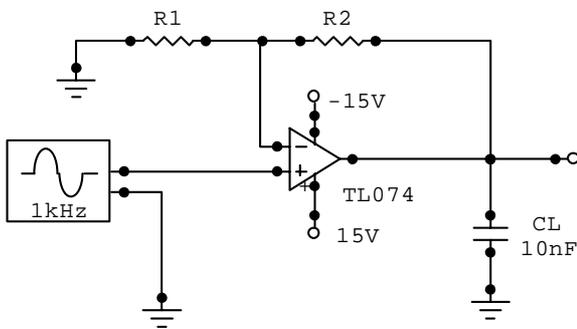
BW = frekuensi cutoff non-inverting amplifier =

$$\frac{\omega_t}{(1 + R_2 / R_1)}$$

BW.  $A_{DC} = \omega_t$

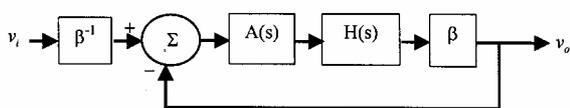
### Non-inverting Amplifier dengan Beban Kapasitif

Beban kapasitif tidak diinginkan karena cenderung membuat amplifier menjadi tidak stabil. Pada bagian ini akan ditunjukkan bagaimana pengaruh beban kapasitif  $C_L$  sebesar 10 nF terhadap respon frekuensi sebuah non-inverting amplifier menggunakan op amp TL074.



Gambar 2. Non-inverting amplifier TL 074 dengan beban kapasitif  $C_L = 10$  nF

Beban kapasitif ( $C_L$ ) akan menambahkan sebuah kutub yang dibentuk bersama hambatan keluaran op amp ( $R_o$ ). Hal ini akan dijelaskan dengan menggambar blok diagram amplifier pada Gambar 1 sebagai berikut :



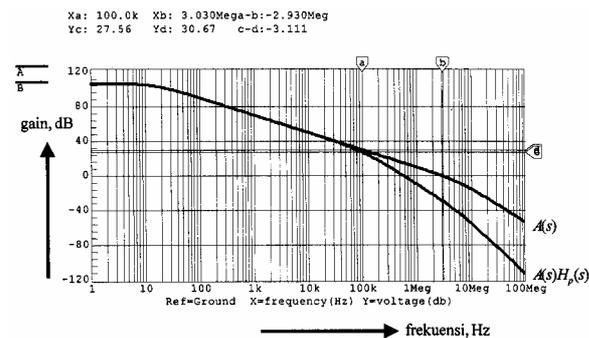
Gambar 3. Blok diagram non-inverting amplifier dengan beban kapasitif

$R_o$  dan  $C_L$  membentuk low pass filter pada keluaran op amp dengan transfer function :

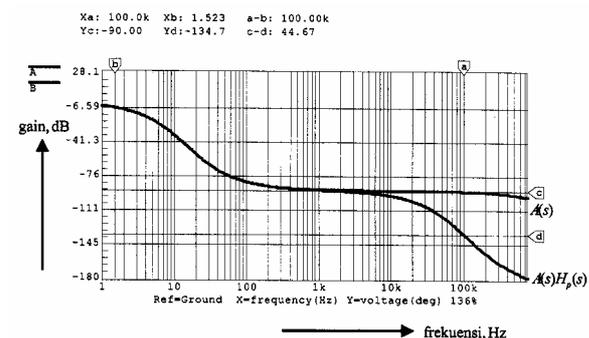
$$H_p(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_p}} \quad (4)$$

di mana :  $\omega_p = 2\pi f_p = \frac{1}{R_o C_L}$

$R_o$  adalah hambatan keluaran op amp TL 074, sedangkan  $\beta$  adalah faktor umpan balik (tegangan seri) pada non-inverting amplifier. Bila  $f_p$  jauh lebih kecil dibanding  $f_t$  maka gain op amp akan turun sekitar  $(-20 \log \beta + 3)$  dB, disertai pengurangan sudut fase sebesar  $45^\circ$  yang terjadi pada frekuensi  $f_p$ . Hal ini ditunjukkan oleh hasil simulasi yang dilakukan dengan perangkat lunak Circuit Maker ver 5.5. Pada simulasi ini dipilih  $\beta$  bernilai satu,  $R_2$  nol dan  $R_1$  tak berhingga, agar pengaruh  $H_p(s)$  terhadap  $A(s)$  dapat diamati dengan jelas seperti ditunjukkan oleh Gambar 4 dan Gambar 5.



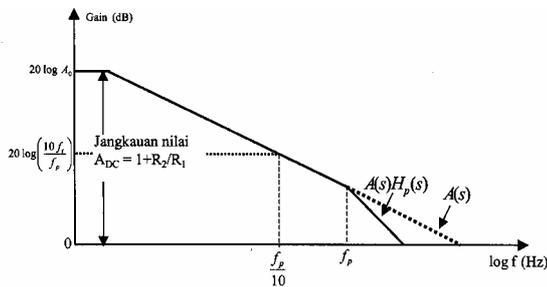
Gambar 4. Perbandingan respon magnitudo  $A(s)$  dan  $\{A(s)H_p(s)\}$



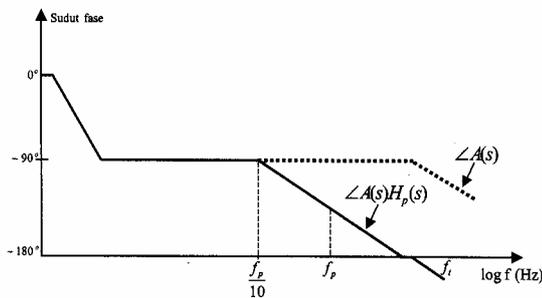
Gambar 5. Perbandingan respon fase  $A(s)$  dan  $\{A(s)H_p(s)\}$

Seperti telah diperkirakan, kurva magnitudo mengalami penurunan 3 dB dan kurva fase berkurang  $45^\circ$  yang terjadi pada frekuensi  $f_p$  sekitar 100 kHz. Ini berarti nilai  $R_o$  TL 074 kira-kira  $(2\pi \cdot 100k \cdot 10n)^{-1}$  atau  $159 \Omega$ . Gambar 4 juga menunjukkan bahwa nilai  $f_t$  TL 074 adalah sekitar 3

MHz. Pengaruh nilai  $A_{DC}$  terhadap kestabilan *non-inverting amplifier* dicari dengan menganalisis *bode plot*  $A(s)$  dan  $\{A(s)H_p(s)\}$  seperti ditunjukkan Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. *Bode plot* magnitudo  $A(s)$  dan  $\{A(s)H_p(s)\}$



Gambar 7. *Bode plot* sudut fase  $A(s)$  dan  $\{A(s)H_p(s)\}$

Berdasarkan kedua gambar di atas maka *amplifier* dengan beban kapasitif akan stabil apabila dipenuhi :

$$A_{DC} \geq 20 \log \left( \frac{10 f_t}{f_p} \right) \quad (5)$$

Jika syarat tersebut tak terpenuhi maka *amplifier* berpotensi tak-stabil (*potentially unstable*). [2]

### Simulasi dan Pengujian *Non-inverting Amplifier* dengan Beban Kapasitif

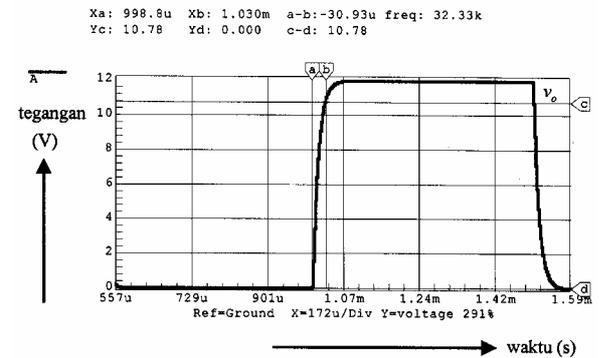
Berdasarkan Gambar 6 dan 7 maka persamaan 5 berarti bahwa kestabilan (relatif) memerlukan *phase margin*  $\phi$  sedikitnya  $90^\circ$ . Agar *amplifier* Gambar 2 memenuhi syarat tersebut maka *gain* DC minimum ( $A_{DCmin}$ ) yang diijinkan adalah :

$$A_{DCmin} = 20 \log \left( \frac{10 f_t}{f_p} \right) \quad (6)$$

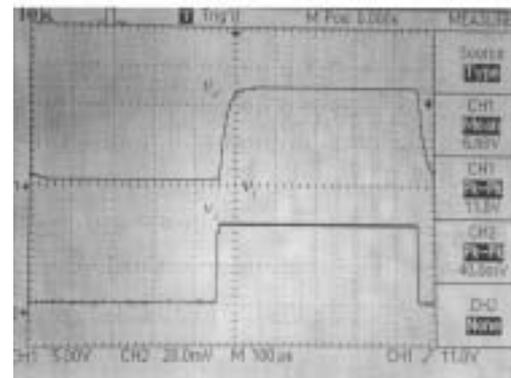
$$A_{DCmin} \approx 300$$

*Amplifier* dengan *gain* 300 tersebut direalisasikan dengan memilih  $R_1 = 1k\Omega$ ,  $R_2 = 299 k\Omega$ , beban kapasitif  $C_L$  ditetapkan 10 nF dan tegangan masukan DC 40 mV<sub>p</sub>, 1 kHz.

Hasil simulasi dan pengujian rangkaian tersebut ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9. Pengamatan bentuk gelombang dilakukan dengan mempergunakan osiloskop digital tipe *Tektronix TDS 220*.



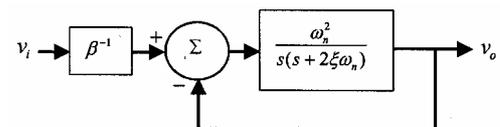
Gambar 8. Hasil simulasi *non-inverting amplifier* TL 074 dengan  $A_{DC} = 300$  dan  $C_L = 10$  nF



Gambar 9. Hasil pengujian *non-inverting amplifier* TL 074 dengan  $A_{DC} = 300$  dan  $C_L = 10$  nF

Terlihat bahwa keluaran hasil simulasi mau pun pengujian rangkaian riil tidak menunjukkan adanya *overshoot*, berarti *amplifier* memang stabil. Namun demikian kenaikan tegangan keluaran berlangsung lambat yang mengindikasikan nilai *damping ratio* ( $\zeta$ ) sistem cukup besar.

Untuk memudahkan analisis kuantitatif terhadap bentuk gelombang tersebut maka blok diagram sistem (Gambar 3) diubah ke dalam bentuk dasar sistem berumpan balik negatif orde dua sebagai berikut : [3]



Gambar 10. Blok diagram dari rangkaian yang diuji

Dengan membandingkan Gambar 10 dengan Gambar 3 didapatkan :

$$\frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)} \approx \beta \frac{\omega_t}{s} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_p}} \quad (7)$$

$$\frac{\omega_n^2}{s(s + 2\xi\omega_n)} \approx \frac{\beta\omega_t\omega_p}{s(s + \omega_p)}$$

Untuk rangkaian yang diuji maka :

$$\begin{aligned} \omega_t &= 6\pi \cdot 10^6 \text{ rad/s,} \\ \omega_p &= 2\pi \cdot 10^5 \text{ rad/s,} \\ \beta &= 1/300 \end{aligned}$$

Bila nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan 7 akan diperoleh :

$$\begin{aligned} \omega_n &= 198,7 \cdot 10^3 \text{ rad/s} \\ \zeta &= 1,58. \end{aligned}$$

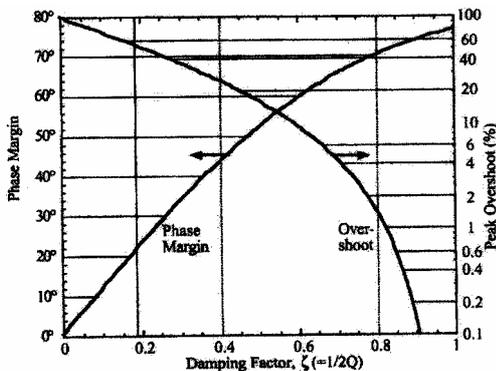
Karena  $\zeta > 1$ , dapat dipahami mengapa sistem tersebut bersifat teredam lebih (*overdamped*).

Dengan masukan *step* beramplitudo  $V$  sebesar 40 mV maka didapatkan keluaran :

$$\begin{aligned} v_o(t) &= V \cdot \beta^{-1} (1 - e^{-(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t}) \\ v_o(t) &= 12(1 - e^{-71 \cdot 10^3 t}) \text{ (volt)} \end{aligned} \quad (8)$$

Berdasarkan persamaan 8, keluaran akan mencapai 90% nilai *steady state* dalam interval waktu sekitar 32  $\mu$ s. Hasil ini sesuai dengan simulasi mau pun pengujian rangkaian (Gambar 8 dan 9) yang menghasilkan nilai sekitar 30  $\mu$ s. Pada pengujian dipakai gelombang kotak DC (bukan *step*) dengan amplitudo sama yaitu 40 mV dan periode  $T$  sebesar 1 ms. Periode masukan tersebut jauh lebih besar dari  $t_s$  (*settling time*) *amplifier* yang nilainya sekitar 30  $\mu$ s berdasarkan Gambar 8. Dengan demikian gelombang kotak tersebut dapat dipakai untuk mencari respon *step* sistem.

Persamaan 5 memang menjamin kestabilan namun tidak menjelaskan apakah *amplifier* yang tidak memenuhinya pasti tak stabil. Untuk mengetahuinya perlu dicari hubungan antara *overshoot* maksimum ( $M_p$ ), *damping ratio* ( $\zeta$ ) dan *phase margin* ( $\phi$ ). Hubungan ketiganya (untuk sistem orde dua) dapat dinyatakan secara grafis sebagai berikut. [4]

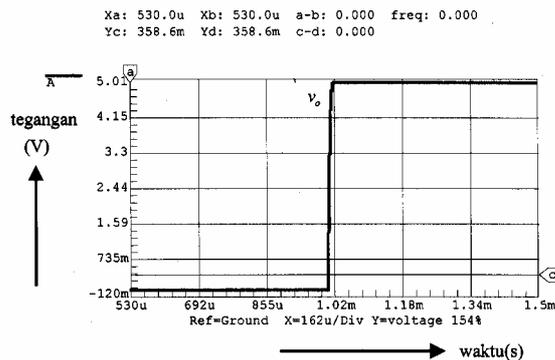


Gambar 11. Grafik hubungan antara  $\zeta$ ,  $\phi$ ,  $M_p$

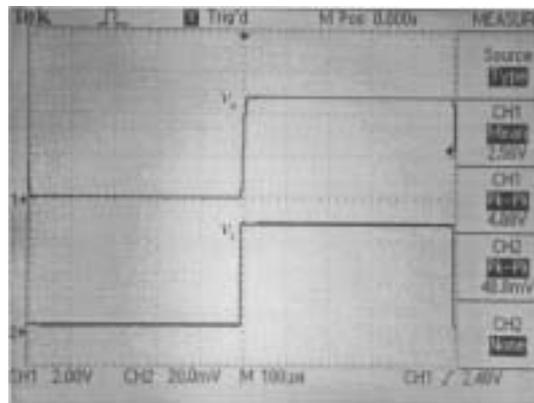
Pengujian dilakukan dengan mengubah-ubah nilai  $A_{DC}$  (lebih kecil dari 300) yang berarti membuat  $\phi$  bervariasi di bawah  $90^\circ$ . Dengan  $\phi$  diketahui maka  $M_p$  dapat diperkirakan melalui Gambar 11.

Misalkan untuk  $A_{DC}$  sebesar 100 atau 40 dB maka dari Gambar 4 dan 5 didapatkan  $\phi$  sekitar  $72^\circ$ , selanjutnya berdasarkan Gambar 11 diperoleh  $M_p$  sekitar 1,5%.

Hasil simulasi dan pengujian rangkaian dengan nilai  $A_{DC}$  tersebut ditunjukkan pada Gambar 12 dan 13.



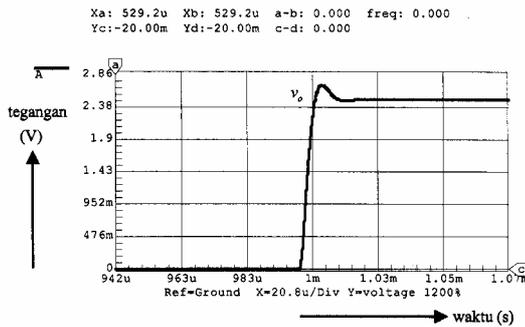
Gambar 12. Hasil simulasi *non-inverting amplifier* TL 074 dengan  $A_{DC} = 100$  dan  $C_L = 10$  nF



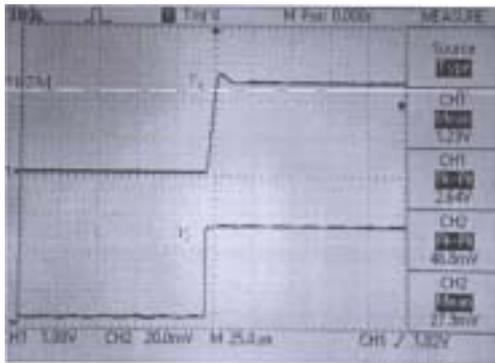
Gambar 13. Hasil pengujian *non-inverting amplifier* TL 074 dengan  $A_{DC} = 100$  dan  $C_L = 10$  nF

Terlihat bahwa *amplifier* justru bekerja lebih baik dibandingkan pada saat  $A_{DC}$  memenuhi syarat  $A_{DCmin}$  yaitu 300. Hal ini ditunjukkan dengan waktu naik (*rise time*) yang menjadi lebih singkat (kurang dari 20  $\mu$ s) sementara *overshoot* tetap kecil sehingga tidak teramati oleh osiloskop.

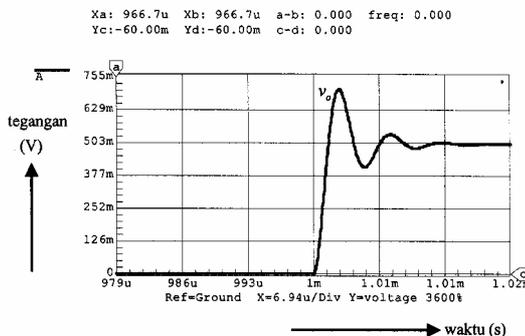
Namun bila  $A_{DC}$  terus diturunkan maka demikian pula  $\phi$ , akibatnya *overshoot* akan bertambah besar. Hal ini dibuktikan oleh hasil simulasi dan pengujian untuk nilai  $A_{DC}$  sebesar 50 (34 dB) dan 10 (20 dB) pada Gambar 14, 15 dan 16, 17.



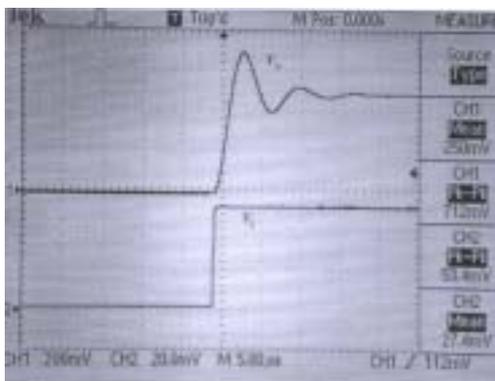
Gambar 14. Hasil simulasi *non-inverting amplifier* TL 074 dengan  $A_{DC} = 50$  dan  $C_L = 10$  nF



Gambar 15. Hasil pengujian *non-inverting amplifier* TL 074 dengan  $A_{DC} = 50$  dan  $C_L = 10$  nF



Gambar 16. Hasil simulasi *non-inverting amplifier* TL 074 dengan  $A_{DC} = 10$  dan  $C_L = 10$  nF



Gambar 17. Hasil pengujian *non-inverting amplifier* TL 074 dengan  $A_{DC} = 10$  dan  $C_L = 10$  nF

Berdasarkan Gambar 4 dan 5, maka untuk nilai  $A_{DC}$  sebesar 50 (34 dB) dan 10 (20 dB) didapatkan *phase margin* berturut-turut  $\phi$  sebesar  $60^\circ$  dan  $30^\circ$ , lalu dengan mempergunakan Gambar 11 diperoleh nilai *overshoot* maksimum ( $M_p$ ) sekitar 8% dan 40%.

Hasil simulasi dan pengujian yang dilakukan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan analisis tersebut. Untuk  $A_{DC}$  sebesar 50 (34 dB) didapatkan  $M_p$  sekitar 8% (simulasi) dan 8,1% (pengujian). Sedangkan untuk  $A_{DC}$  sebesar 10 (20 dB) diperoleh  $M_p$  sekitar 40% (simulasi) dan 42% (pengujian).

### Kesimpulan

Adanya beban kapasitif  $C_L$  sebesar 10 nF pada *non-inverting amplifier* menggunakan *op amp* TL 074 yang memiliki *unity-gain frequency* ( $f_t$ ) sebesar 3 MHz mengakibatkan terbentuknya sebuah kutub tambahan ( $f_p$ ) pada frekuensi sekitar sepertiga puluh  $f_t$  atau 100 kHz. Menurut acuan yang dipakai, syarat agar *amplifier* stabil adalah nilai  $A_{DC}$  (*close loop gain* pada frekuensi nol) minimum sama dengan sepuluh kali ( $f_t/f_p$ ) atau 300. Berdasarkan analisis dan pengujian, pemenuhan syarat tersebut memang meniadakan *overshoot* namun respon *amplifier* terhadap masukan *step* menjadi cukup lambat.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa untuk  $A_{DC}$  sebesar 100 maka *overshoot* yang terjadi masih sangat kecil sementara respon *amplifier* menjadi lebih cepat, sehingga bentuk keluaran semakin mendekati masukannya. Jadi dapat disimpulkan bahwa syarat tersebut tidak perlu dipenuhi secara ketat.

Namun demikian nilai  $A_{DC}$  tidak boleh terlalu kecil karena akan berpengaruh sama terhadap nilai *phase margin*. Bila *phase margin* menurun maka *overshoot* naik sehingga kestabilan relatif dari *amplifier* akan berkurang. Hasil pengujian menunjukkan untuk nilai  $A_{DC}$  berkisar antara sepertiga puluh sampai seperenam dari persyaratan tersebut, didapatkan *overshoot* maksimum antara 8% sampai 42%. Apakah jangkauan *overshoot* itu masih diperbolehkan bergantung pada jenis aplikasi yang mempergunakan *non-inverting amplifier* tersebut.

### Daftar Pustaka

- [1]. Sedra, A.S., and Smith, K.C., *Microelectronic Circuits*, 2<sup>nd</sup> ed., Holt, Rienhart and Winston, New York, 1987.
- [2] [http://www.analog.com/Analog\\_Root/static/techSupport/designTools/interactiveTools/stability/stability.html](http://www.analog.com/Analog_Root/static/techSupport/designTools/interactiveTools/stability/stability.html)

- [3]. Ogata, K., Modern Control Engineering, Prentice-Hall, New Delhi, 1984
- [4]. [http://users.ece.gatech.edu/~pallen/Academic/ECE\\_6414/ece\\_6414.htm](http://users.ece.gatech.edu/~pallen/Academic/ECE_6414/ece_6414.htm)
- [5]. National Semiconductor, *National Operational Data Book*, 1995
- [6]. Mancini, R., *ed.*, Op Amps for Everyone, Oxford : Newnes, 2003