

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.

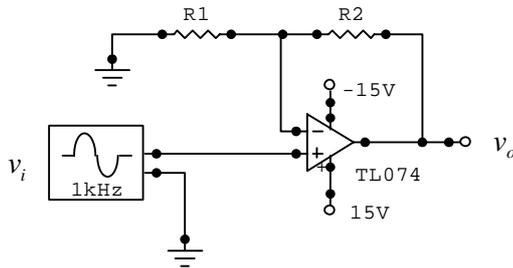
Abstract

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 :

$$A_{cl}(s) = \frac{v_o}{v_i} \quad (2)$$

$$A_{cl}(s) = \frac{1 + R_2 / R_1}{1 + \frac{1}{A_0} (1 + R_2 / R_1) + \frac{s}{\omega_t (1 + R_2 / R_1)}}$$

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.

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

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

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

di mana :

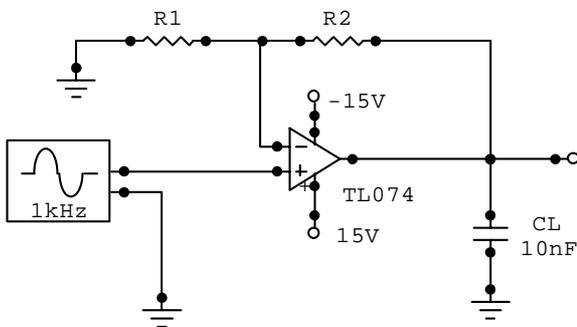
BW = frekuensi cutoff non-inverting amplifier =

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

BW. $A_{DC} = \omega_t$

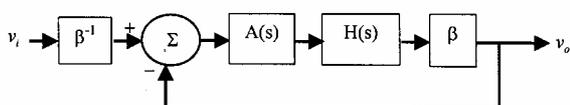
Non-inverting Amplifier dengan Beban Kapasitif

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 :



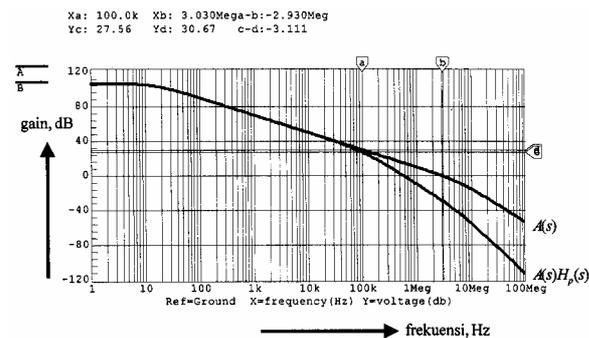
Gambar 3. Blok diagram non-inverting amplifier dengan beban kapasitif

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

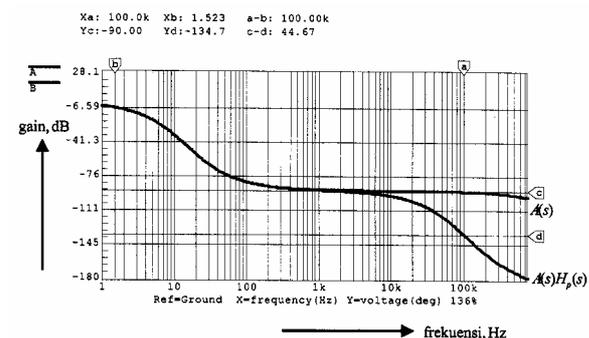
$$H_p(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_p}} \quad (4)$$

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

R_o adalah hambatan keluaran op amp TL 074, sedangkan β 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° 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 β 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.



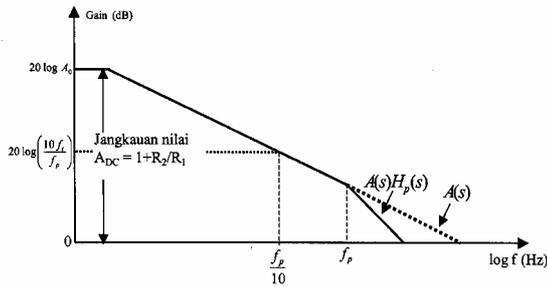
Gambar 4. Perbandingan respon magnitudo $A(s)$ dan $\{A(s)H_p(s)\}$



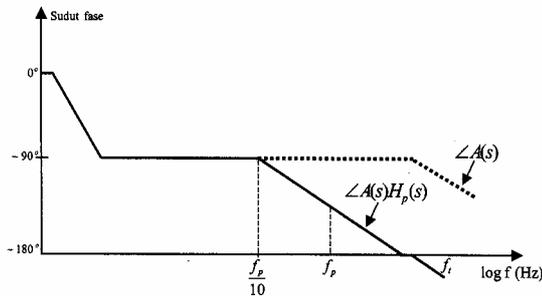
Gambar 5. Perbandingan respon fase $A(s)$ dan $\{A(s)H_p(s)\}$

Seperti telah diperkirakan, kurva magnitudo mengalami penurunan 3 dB dan kurva fase berkurang 45° 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 159Ω . 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

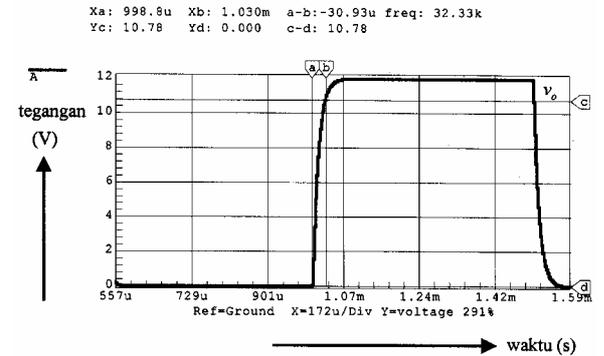
Berdasarkan Gambar 6 dan 7 maka persamaan 5 berarti bahwa kestabilan (relatif) memerlukan *phase margin* ϕ sedikitnya 90° . Agar *amplifier* Gambar 2 memenuhi syarat tersebut maka *gain* DC minimum (A_{DCmin}) yang diijinkan adalah :

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

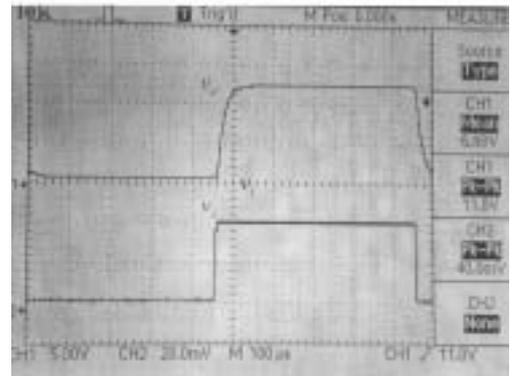
$$A_{DCmin} \approx 300$$

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_p, 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*.



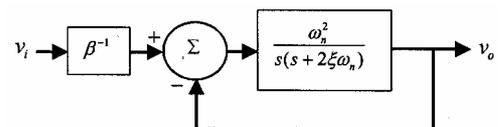
Gambar 8. Hasil simulasi *non-inverting amplifier* TL 074 dengan $A_{DC} = 300$ dan $C_L = 10$ nF



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* (ζ) 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 :

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

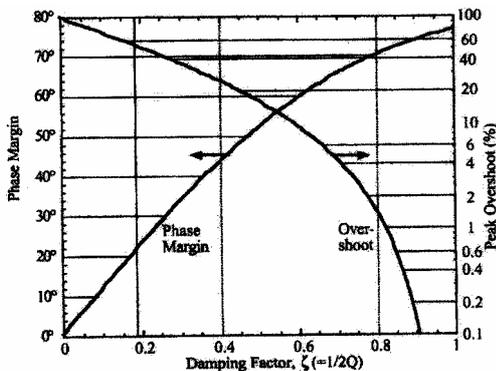
Karena $\zeta > 1$, dapat dipahami mengapa sistem tersebut bersifat teredam lebih (*overdamped*).

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 μ s. Hasil ini sesuai dengan simulasi mau pun pengujian rangkaian (Gambar 8 dan 9) yang menghasilkan nilai sekitar 30 μ 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 μ 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* (ζ) dan *phase margin* (ϕ). Hubungan ketiganya (untuk sistem orde dua) dapat dinyatakan secara grafis sebagai berikut. [4]

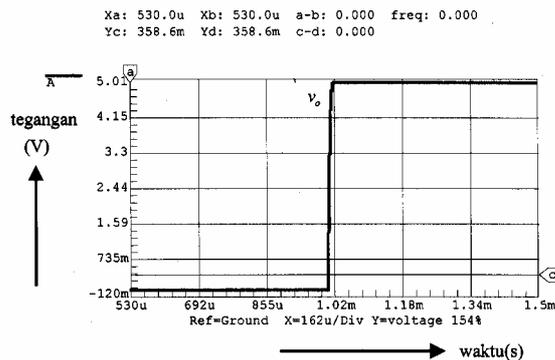


Gambar 11. Grafik hubungan antara ζ , ϕ , M_p

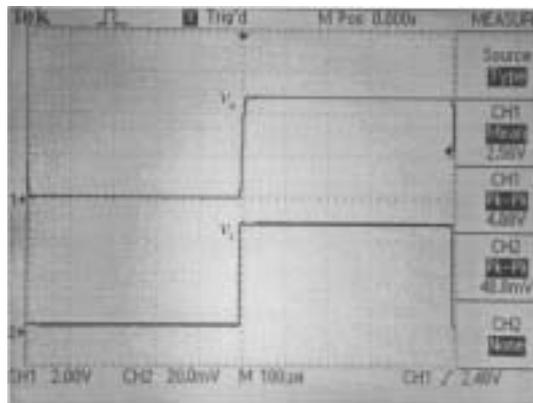
Pengujian dilakukan dengan mengubah-ubah nilai A_{DC} (lebih kecil dari 300) yang berarti membuat ϕ bervariasi di bawah 90° . Dengan ϕ diketahui maka M_p dapat diperkirakan melalui Gambar 11.

Misalkan untuk A_{DC} sebesar 100 atau 40 dB maka dari Gambar 4 dan 5 didapatkan ϕ sekitar 72° , 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.



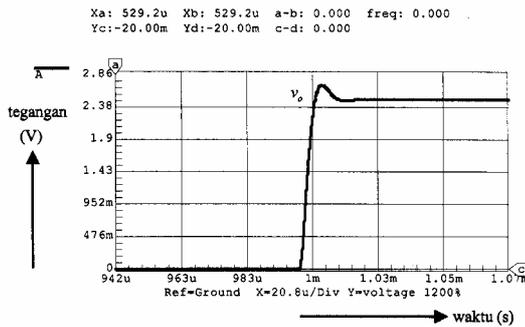
Gambar 12. Hasil simulasi *non-inverting amplifier* TL 074 dengan $A_{DC} = 100$ dan $C_L = 10$ nF



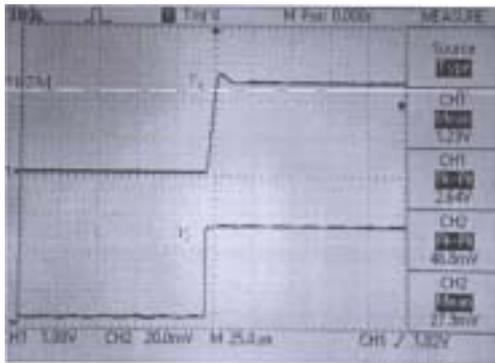
Gambar 13. Hasil pengujian *non-inverting amplifier* TL 074 dengan $A_{DC} = 100$ dan $C_L = 10$ nF

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 μ s) sementara *overshoot* tetap kecil sehingga tidak teramati oleh osiloskop.

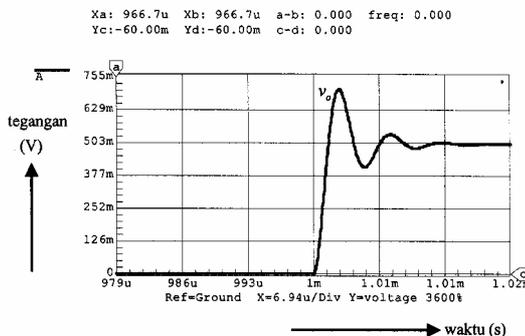
Namun bila A_{DC} terus diturunkan maka demikian pula ϕ , akibatnya *overshoot* akan bertambah besar. Hal ini dibuktikan oleh hasil simulasi dan pengujian untuk nilai A_{DC} sebesar 50 (34 dB) dan 10 (20 dB) pada Gambar 14, 15 dan 16, 17.



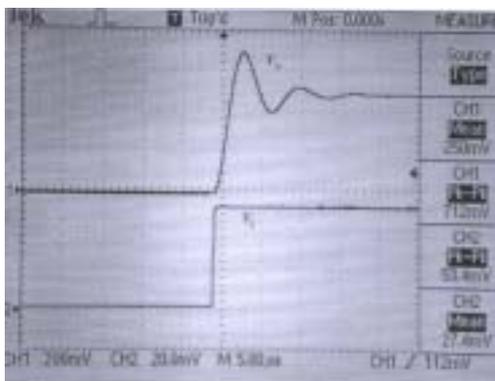
Gambar 14. Hasil simulasi *non-inverting amplifier* TL 074 dengan $A_{DC} = 50$ dan $C_L = 10$ nF



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 ϕ sebesar 60° dan 30° , 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*, 2nd ed., Holt, Rienhart and Winston, New York, 1987.
- [2] 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
- [5]. National Semiconductor, *National Operational Data Book*, 1995
- [6]. Mancini, R., *ed.*, Op Amps for Everyone, Oxford : Newnes, 2003