

## ANALISIS STABILITAS SUHU TERAS REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG AKIBAT TRANSIEN REAKTIVITAS

Dudung Abdul Razak, Reinaldy Nazar  
Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknik Nuklir – BATAN

### ABSTRAK

**ANALISIS STABILITAS SUHU TERAS REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG AKIBAT TRANSIEN REAKTIVITAS.** Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh gambaran tentang stabilitas dan respon transien suhu teras akibat perubahan reaktivitas selama operasi rutin. Diasumsikan reaktor sebagai suatu sistem linier tergroupal dengan neutron kasip satu grup, pengaruh fraksi hampa serta racun xenon terhadap reaktivitas diabaikan. Dari hasil evaluasi yang dilakukan dengan metode Nyquist, metode Root Locus dan diagram Bode diperoleh informasi bahwa, sistem selalu dalam keadaan stabil berapapun penguatannya dan mempunyai respon transien yang baik, karena perbandingan koefisien suhu negatif air terhadap bahan bakar adalah 1,54 lebih kecil dari batas atasnya, yaitu  $14 \times 10^6$ . Dengan menggunakan diagram Bode dapat ditunjukkan pula sistem mempunyai kestabilan relatif dengan *gain margin* 65 db dan *phase margin*  $41^\circ$  yang terjadi pada frekuensi-frekuensi jauh di atas frekuensi termal.

**Kata kunci :** stabilitas, respon transien, reaktivitas, suhu teras, sistem linier, tergroupal metode Nyquist, metode Root Locus, diagram Bode.

### ABSTRACT

**STABILITY ANALYSIS OF TRIGA 2000 BANDUNG REACTOR CORE HEAT DUE TO REACTIVITY TRANSIENT.** This research was carried out to obtain description of stability and transient response of core temperature due to reactivity changes during routine operation. Assuming the reactor as lumped linier system with one group delayed neutron and neglecting void fraction effect and xenon poison, evaluation of the system has been determined by Nyquist and Root Locus methods. Analysis result of the system shows that it is always stable no matter how large the magnitude factor is and it has a good transient response because the negative temperature coefficient ratio of water to fuel is equal to 1.54 which is less than  $14 \times 10^6$  as its upper limit. By Bode diagram, it can also shown that the system has relative stability with 65 db gain margin and  $41^\circ$  phase margin which occurs at frequencies much higher than thermal neutron frequency.

**Key words :** stability, transient response, core temperature, lumped linier system, Nyquist methods, Root Locus methods, Bode diagram



## **PENDAHULUAN**

Ketika reaktor dioperasikan dengan penyisipan reaktivitas secara mendadak, maka suhu bahan bakar akan meningkat secara tiba-tiba. Apabila suhu bahan bakar melewati suhu batas maksimum [1], maka reaktor akan mengalami kecelakaan. Karena itu perlu dilakukan kajian mendalam untuk mengetahui stabilitas termal reaktor TRIGA 2000 Bandung.

Teknik kontrol terhadap sistem reaktor adalah hal yang penting, karena dapat memprediksi kejadian pada sistem reaktor tersebut. Untuk memperoleh gambaran stabilitas sistem teras reaktor dan mengetahui bagaimana tanggapan transien suhu teras akibat adanya perubahan reaktivitas, dilakukan penelitian terhadap keselamatan sistem teras reaktor dengan perubahan reaktivitas sebagai masukan dan perubahan suhu teras sebagai keluaran.

Diharapkan dari hasil penelitian ini dapat diperoleh informasi bahwa, reaktor TRIGA 2000 Bandung beroperasi dalam kondisi stabil pada berbagai bentuk dan besar penguatan serta perubahan reaktivitas yang dapat dilakukan. Respon transien yang baik dan tidak bergantung pada besarnya penguatan juga harus dimiliki oleh sistem reaktor ini.

Pada penelitian ini diasumsikan teras reaktor sebagai suatu sistem linier tergumpal dengan neutron kasip satu grup, di mana harga parameter sistem seperti panas jenis bahan bakar, koefisien perpindahan panas di dalam teras dan parameter neutron dianggap tetap sama dengan harga rata-ratanya untuk seluruh daerah suhu operasi. Diasumsikan juga reaktor dioperasikan rutin setiap hari, yang dimulai dari kondisi dingin dan bersih, sehingga fraksi hampa dan racun xenon terhadap reaktivitas diabaikan.

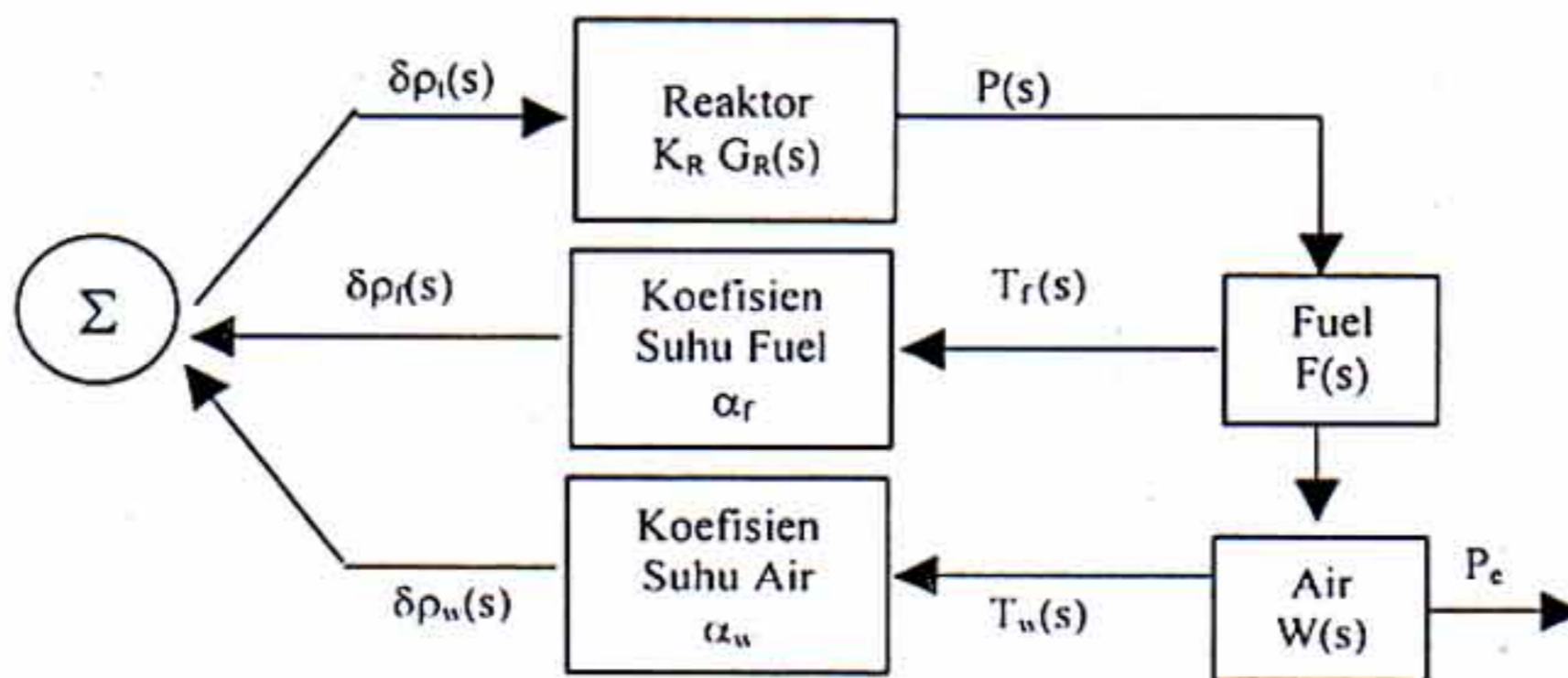
Penelitian ini merupakan suatu studi eksperimental sistem teras reaktor TRIGA 2000 Bandung. Melalui kajian teoritik dilakukan analisis stabilitas dan respon transien menggunakan metode Root Locus, Nyquist dan Diagram Bode.



## TEORI

Reaktor mempunyai dua macam umpan balik, yaitu umpan balik eksterna dan umpan balik interna. Lup umpan balik eksterna yaitu lup yang berhubungan dengan sirkulasi pendingin reaktor, sedangkan lup umpan balik interna disebabkan karena pengaruh suhu dan peracunan xenon. Pada penelitian ini hanya dibahas umpan balik interna yang diakibatkan pengaruh suhu, sedangkan umpan balik interna yang diakibatkan peracunan xenon diabaikan dan tidak dibahas.

Sistem umpan balik antara reaktivitas dan suhu teras secara skematik dapat digambarkan dalam bentuk diagram blok dengan fungsi alihnya seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem umpan balik antara reaktivitas dan suhu teras

Akibat konduktivitas termal antara bahan bakar dan kelongsong cukup besar, maka pada sistem tergumpal Gambar 1 tidak ada waktu tunda antara suhu bahan bakar dan suhu kelongsong, sehingga persamaan-persamaan untuk sistem umpan balik Gambar 1 adalah :

$$P = U_f \frac{dT_f}{dt} + P_w \quad (1)$$

$$P_w = U_w \frac{dT_w}{dt} + P_e \quad (2)$$



$$P_w = h(T_f - T_w) \quad (3)$$

$$\alpha_f(T_f) = \frac{\delta\rho}{\delta T_f} \quad (4)$$

$$\alpha_w(T_w) = \frac{\delta\rho}{\delta T_w} \quad (5)$$

$$K_R G_R(s) = \frac{n_o(s + \lambda)}{s \cdot l(s + \frac{\beta_{eff}}{l})} \quad (6)$$

dengan :  $T_f$  = suhu bahan bakar

$T_w$  = suhu air pendingin

$U_f$  = kapasitas kalor bahan bakar

$U_w$  = kapasitas kalor air pendingin

$h$  = koefisien perpindahan panas antara elemen bahan bakar dan air pendingin

$P$  = daya termal reaktor

$P_e$  = daya keluaran dari air pendingin

$P_w$  = daya yang dipindahkan dari bahan bakar ke air pendingin

$\alpha_f$  = koefisien reaktivitas suhu bahan bakar

$\alpha_w$  = koefisien reaktivitas suhu air pendingin

$\beta_{eff}/l$  = perbandingan fraksi neutron kasip terhadap umur neutron

$\rho$  = reaktivitas dan  $\lambda$  = konstanta peluruhan hasil fisi

### Linierisasi persamaan umpan balik reaktor

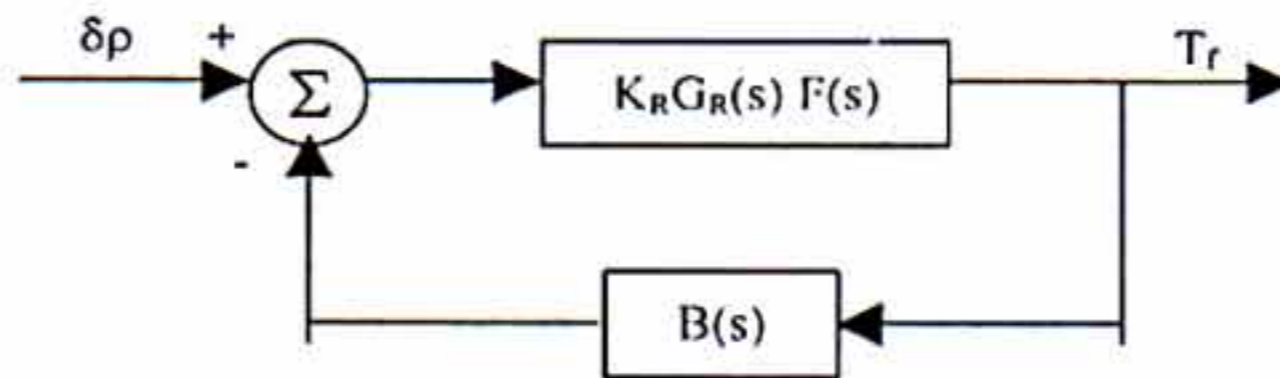
Dengan metode gangguan kecil di sekitar daya konstan, persamaan (1), (2) dan (3) dapat dilinierisasi dan dikombinasikan dalam bentuk Laplace sebagai berikut [2]:

$$W(s) = \frac{h}{s[h(U_f + U_w) + U_f U_w s]} \quad (7)$$



$$F(s) = \frac{(h + U_w s)}{s[h(U_f + U_w) + U_f U_w s]} \quad (8)$$

Dengan menggunakan rumus Mason, Gambar 1 dapat disederhanakan menjadi Gambar 2, dengan reaktivitas sebagai masukan dan suhu bahan bakar sebagai keluaran.



Gambar 2. Diagram blok sistem lup tertutup

Berdasarkan diagram Gambar 2 dapat ditulis persamaan-persamaan berikut :

$$K_R G_R(s) F(s) = \frac{n_o (s + \lambda) (h + U_w s)}{s.l (s + \frac{\beta_{eff}}{l}) s [h(U_f + U_w) + U_f U_w s]} \quad (9)$$

$$B(s) = \frac{(\alpha_w h + \alpha_f h + \alpha_f U_w s)}{(h + U_w s)} \quad (10)$$

Persamaan fungsi alih sistem lup terbukanya adalah :

$$K_R G_R(s) F(s) B(s) = \frac{n_o (s + \lambda) (h + U_w s) (\alpha_w h + \alpha_f h + \alpha_f U_w s)}{s.l (s + \frac{\beta_{eff}}{l}) s [h(U_f + U_w) + U_f U_w s] (h + U_w s)} \quad (11)$$

$$K_R G_R(s) F(s) B(s) = \frac{n_o (s + \lambda) [h(\alpha_w + \alpha_f) + \alpha_f U_w s]}{s^2 .l (s + \frac{\beta_{eff}}{l}) [h(U_f + U_w) + U_f U_w s]} \quad (12)$$

atau

$$K_R G_R(s) F(s) B(s) = C \frac{(s + \lambda)(s + \frac{1}{\tau_1})}{(s + r)(s + \frac{1}{\tau_2})} \quad (13)$$

dengan



$$C = \frac{n_o \alpha_f}{l U_f} \quad \tau_1 = \frac{\alpha_f U_w}{h(\alpha_w + \alpha_f)} \quad \tau_2 = \frac{U_f U_w}{h(U_w + U_f)} \quad r = \frac{\beta_{eff}}{l}$$

Untuk  $\alpha_f$  dan  $\alpha_w$  yang negatif, sistem menjadi tidak stabil bila sudut fasenya positif.

$$\frac{(s + \lambda)(s + \frac{1}{\tau_1})}{(s + r)(s + \frac{1}{\tau_2})} > 0 \quad (14)$$

Sehingga syarat sistem itu stabil adalah :

$$\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} < r - \lambda \quad (15)$$

$$\frac{h(\alpha_w + \alpha_f)}{\alpha_f U_w} - \frac{h(U_w + U_f)}{U_f U_w} < r - \lambda \quad (16)$$

atau

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_f} < \frac{U_w}{h} (r - \lambda) + \frac{U_w}{U_f} \quad (17)$$

Apabila hubungan ketidaksamaan persamaan (17) digambarkan pada bidang  $\alpha_f$  dan  $\alpha_w$  sebagai sistem salib sumbu, akan diperoleh gambar yang menunjukkan daerah kestabilan sistem, seperti Gambar 3 [3].

### Perhitungan koefisien perpindahan panas (h)

$$h_c = \frac{0,13 (G_{rL} \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \cdot k}{L} \quad (18)$$

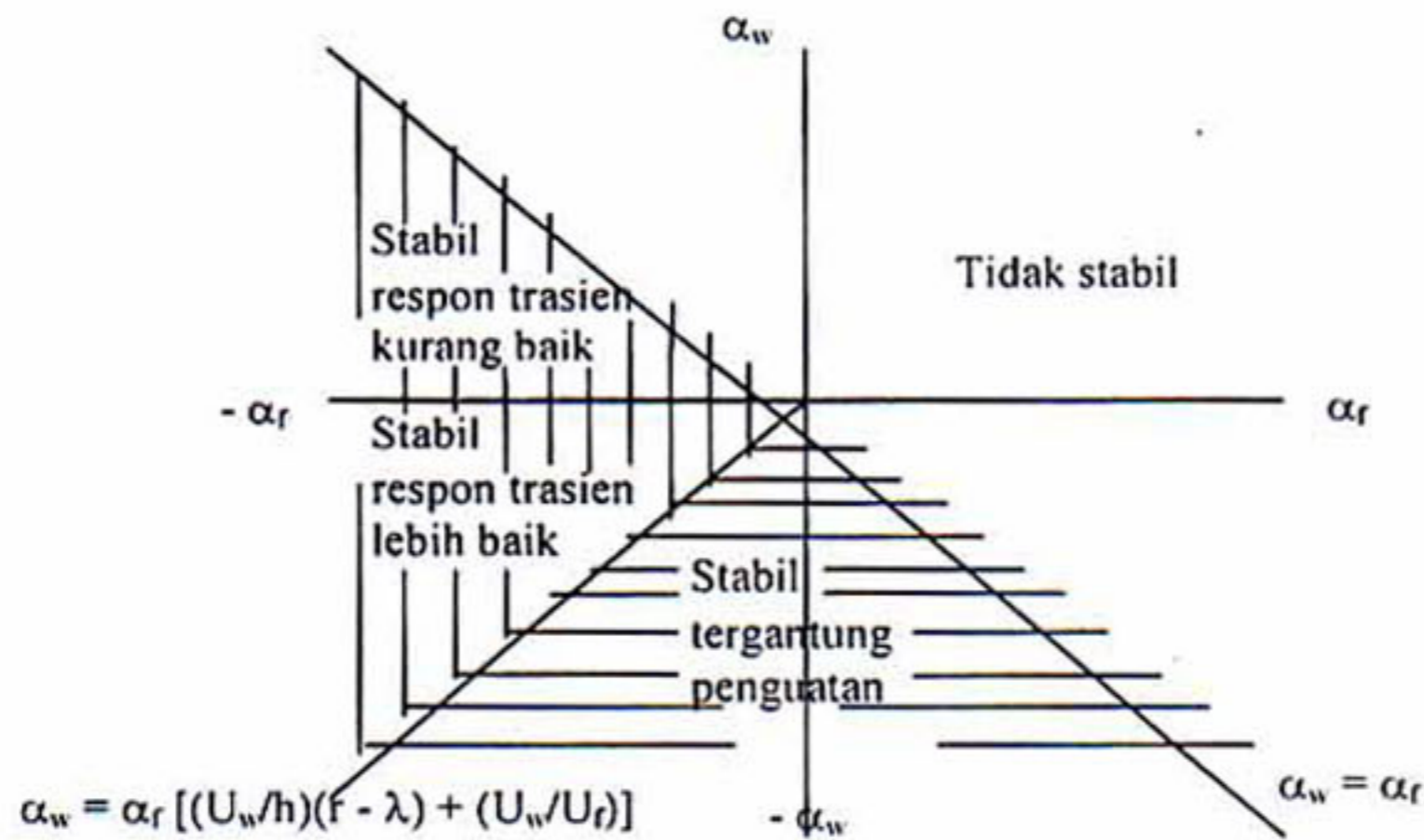
$$\beta = \frac{2}{T_f + T_c}$$

$$G_{rL} = \frac{g \beta (T_f - T_c) L^3}{\varphi^2}$$

dengan  $L$  = panjang aktif bahan bakar

$\varphi$  = laju aliran pendingin di dalam teras





Gambar 3. Daerah stabilitas tergantung pada parameter  $\alpha_r$  dan  $\alpha_w$

**Perhitungan kapasitas kalor bahan bakar ( $U_f$ ) dan air ( $U_w$ )**

$$U_f = M_f \cdot C_{pf} \tag{19}$$

$$U_w = M_w \cdot C_{pw} \tag{20}$$

- dengan  $M_f$  = massa bahan bakar (kg)  
 $M_w$  = massa air pendingin (kg)  
 $C_{pf}$  = panas jenis bahan bakar (J/kg °C)  
 $C_{pw}$  = panas jenis air pendingin (J/kg °C)

**BAHAN DAN TATA KERJA**

Untuk memperoleh fungsi alih dari sistem teras reaktor yang ditentukan kestabilannya, diukur parameter-parameter yang diperlukan, yaitu suhu bahan bakar ( $T_f$ ), suhu air pendingin dalam teras ( $T_w$ ), reaktivitas batang kendali ( $\rho$ ) dan daya reaktor. Pengukuran dilakukan pada daya reaktor 100 kW sampai dengan 2000 kW.

Dari data hasil pengukuran dan data acuan lainnya yang diperlukan, dihitung nilai parameter-parameter yang digunakan untuk menentukan kestabilan reaktor, yaitu :



1. Perhitungan koefisien reaktivitas bahan bakar ( $\alpha_f(T_f)$ ) dan air pendingin ( $\alpha_w(T_w)$ )
2. Perhitungan koefisien perpindahan panas ( $h_c$ )
3. Perhitungan kapasitas kalor bahan bakar ( $U_f$ ) dan air pendingin ( $U_w$ )
4. Perhitungan parameter-parameter fungsi alih sistem
5. Analisis kestabilan dengan metode Nyquist
6. Analisis kestabilan dengan metode diagram Bode
7. Analisis kestabilan dengan metode Root Locus

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Data-data hasil pengukuran dan perhitungan ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

### Perhitungan parameter-parameter fungsi alih sistem

Diketahui  $\beta_{eff} = 0,0072$ ,  $l = 34 \mu s = 34 \cdot 10^{-6} s$  dan  $\lambda = 0,094 s^{-1}$

Dengan menggunakan data di atas, diperoleh :

$$r = \frac{\beta_{eff}}{l} = \frac{0,0072}{34 \cdot 10^{-6}} = 211 s^{-1}$$

$$\tau_1 = \frac{\alpha_f U_w}{h(\alpha_w + \alpha_f)} = \frac{7,8 \times 10^{-5} \cdot (28584)}{0,43 \cdot (7,8 \times 10^{-5} + 1,2 \times 10^{-5})} = 27186 cm^2 s$$

$$\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{27186} = 4 \times 10^{-5} cm^{-2} s^{-1}$$

$$\tau_2 = \frac{U_f U_w}{h(U_w + U_f)} = \frac{(651)(28584)}{0,43(651 + 28584)} = 1414 cm^2 s$$

$$\frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{1414} = 7,1 \times 10^{-4} cm^{-2} s^{-1}$$

$$C = \frac{n_0 \alpha_f}{l U_f} = \frac{(7,3 \times 10^8)(7,8 \times 10^{-5})}{(3,4 \times 10^{-6})(28584)} = 5,86 \times 10^4 cm^2 \cdot Joule^{-1} \cdot s^{-1}$$



Tabel 1. Data hasil-hasil pengukuran

NO.	DAYA REAKTOR (kW)	WAKTU (jam)	REAKTIVITAS (\$)	SUHU IFE (°C)	SUHU AIR (°C)
1	100	10.45	8,167	77	24,5
2	200	10.55	8,394	113	25,1
3	300	11.05	8,616	141	26,1
4	400	11.15	8,789	169	27,8
5	500	11.25	8,991	191	29,5
6	600	11.35	9,103	217	31,5
7	700	11.45	9,229	240	34,5
8	800	11.55	9,341	256	39,2
9	900	12.05	9,443	269	44,7
10	1000	12.15	9,539	281	49,4
11	1100	12.25	9,623	290	54,2
12	1200	12.35	9,694	297	58,5
13	1300	12.45	9,761	303	62,5
14	1400	12.55	9,826	306	66,3
15	1500	13.05	9,878	309	69,5
16	1600	13.15	9,927	311	72,5
17	1700	13.25	9,962	313	75,3
18	1800	13.35	9,991	315	77,7
19	1900	13.45	10,007	317	79,7
20	2000	13.55	10,017	318	81,0

Tabel 2. Data hasil-hasil perhitungan

NO.	PARAMETER	HARGA RATA-RATA
1.	Koefisien reaktivitas bahan bakar ( $\alpha_f(T_f)$ )	$(7,8 \pm 0,4) \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$
2.	Koefisien reaktivitas air pendingin ( $\alpha_w(T_w)$ )	$(1,2 \pm 0,2) \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$
3.	Koefisien perpindahan panas ( $h_c$ )	$(0,43 \pm 0,013) \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
4.	Kapasitas kalor bahan bakar ( $U_f$ )	651,2 Joule/ $^\circ\text{C}$
5.	Kapasitas kalor air pendingin ( $U_w$ )	28583,88 Joule/ $^\circ\text{C}$

### Analisis kestabilan

Substitusi harga parameter-parameter fungsi alih ke persamaan (13) diperoleh :



$$K_R G_R(s) F(s) B(s) = \frac{5,86 \times 10^4 (s + 0,094)(s + 0,00004)}{s^2 (s + 211)(s + 0,00071)} \quad (21)$$

Syarat kestabilan :  $\frac{\alpha_w}{\alpha_f} < \frac{U_w}{h} (r - \lambda) + \frac{U_w}{U_f}$

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_f} = \frac{1,2 \times 10^{-4}}{7,8 \times 10^{-5}} = 1,54$$

$$\frac{U_w}{h} (r - \lambda) + \frac{U_w}{U_f} = \frac{2854}{0,43} (211 - 0,094) + \frac{28584}{651} = 140 \times 10^5$$

Karena  $\alpha_w/\alpha_f = 1,54$  lebih kecil dari nilai ruas kanan yang menjadi kriteria stabilitas yaitu  $14 \times 10^6$ , berarti sistem stabil dan mempunyai tanggapan transien yang baik.

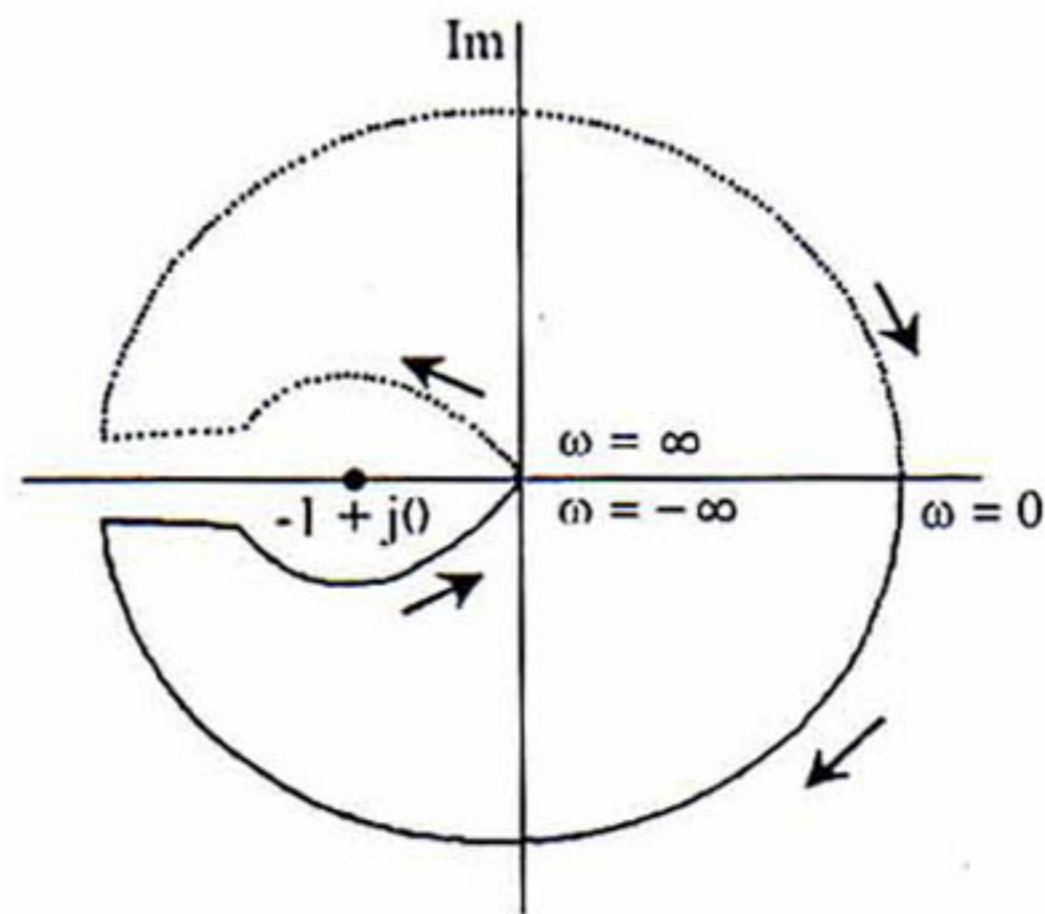
#### Analisis kestabilan dengan diagram Nyquist

Persamaan (21) dapat ditulis dalam bentuk persamaan (22) di bawah ini.

$$K_R G_R(s) F(s) B(s) = \frac{1,47 (10,6s + 1)(25000s + 1)}{s^2 (0,005s + 1)(1408s + 1)} \quad (22)$$

Diagram Nyquist untuk sistem persamaan di atas ditunjukkan pada Gambar 4. Pada Gambar 4 tersebut terlihat bahwa sistem tidak mengelilingi titik  $(-1 + j0)$  dan semua *pole* serta *zero* dari  $K_R G_R(s) F(s) B(s)$  terletak disebelah kiri sumbu khayal, dengan demikian sistem stabil untuk seluruh daerah frekuensi. Makin tinggi frekuensi, modulus diagram makin kecil dan mendekati titik  $(-1 + j0)$ , tetapi tidak melingkupinya. Ini berarti bahwa, semakin tinggi energi mayoritas neutron yang ada di dalam teras, stabilitas sistem semakin berkurang.





Gambar 4. Diagram Nyquist untuk sistem teras reaktor TRIGA 2000 Bandung

#### Analisis kestabilan dengan diagram Bode

Persamaan (21) dapat juga dituliskan dalam bentuk persamaan di bawah ini

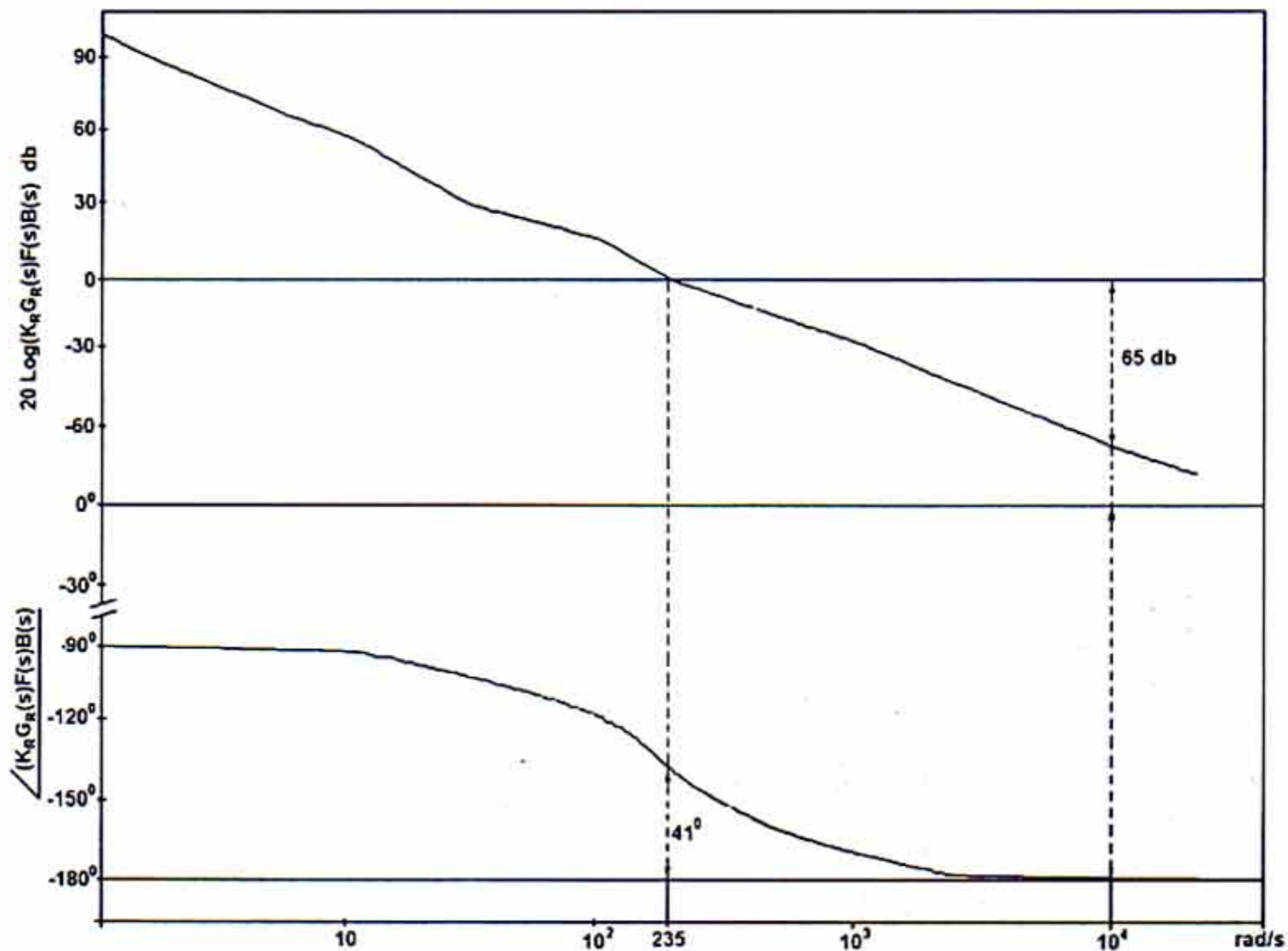
$$K_R G_R(s) F(s) B(s) = \frac{1,47 (1 + 10,6 j\omega)(1 + 25000 j\omega)}{j\omega^2 (1 + 0,005 j\omega)(1 + 1408 j\omega)} \quad (23)$$

$$20 \log K_R G_R(s) F(s) B(s) = 20 \log(1,47) + 20 \log(10,6\omega) + 20 \log(25000\omega) - 40 \log(\omega) - 20 \log(0,005\omega) - 20 \log(1408\omega) \quad (24)$$

$$\angle K_R G_R(s) F(s) B(s) = \text{Tan}^{-1}(10,6\omega) + \text{Tan}^{-1}(25000\omega) - 180 - \text{Tan}^{-1}(0,005\omega) - \text{Tan}^{-1}(1408\omega) \quad (25)$$

Substitusikan harga  $\omega$  pada persamaan (24) dan persamaan (25) diperoleh diagram Bode seperti Gambar 5 di bawah ini.





Gambar 5. Diagram Bode untuk sistem teras reaktor TRIGA 2000 Bandung

Pada Gambar 5, terlihat bahwa sistem mempunyai *Phase Margin*  $41^\circ$  dan *Gain Margin* 65 db, sedangkan syarat sistem stabil, yaitu *phase margin* terletak antara  $30^\circ$  dan  $60^\circ$ , serta *gain margin* lebih besar dari 6 db. Dengan demikian reaktor TRIGA 2000 Bandung mempunyai stabilitas dan tanggapan transien yang baik.

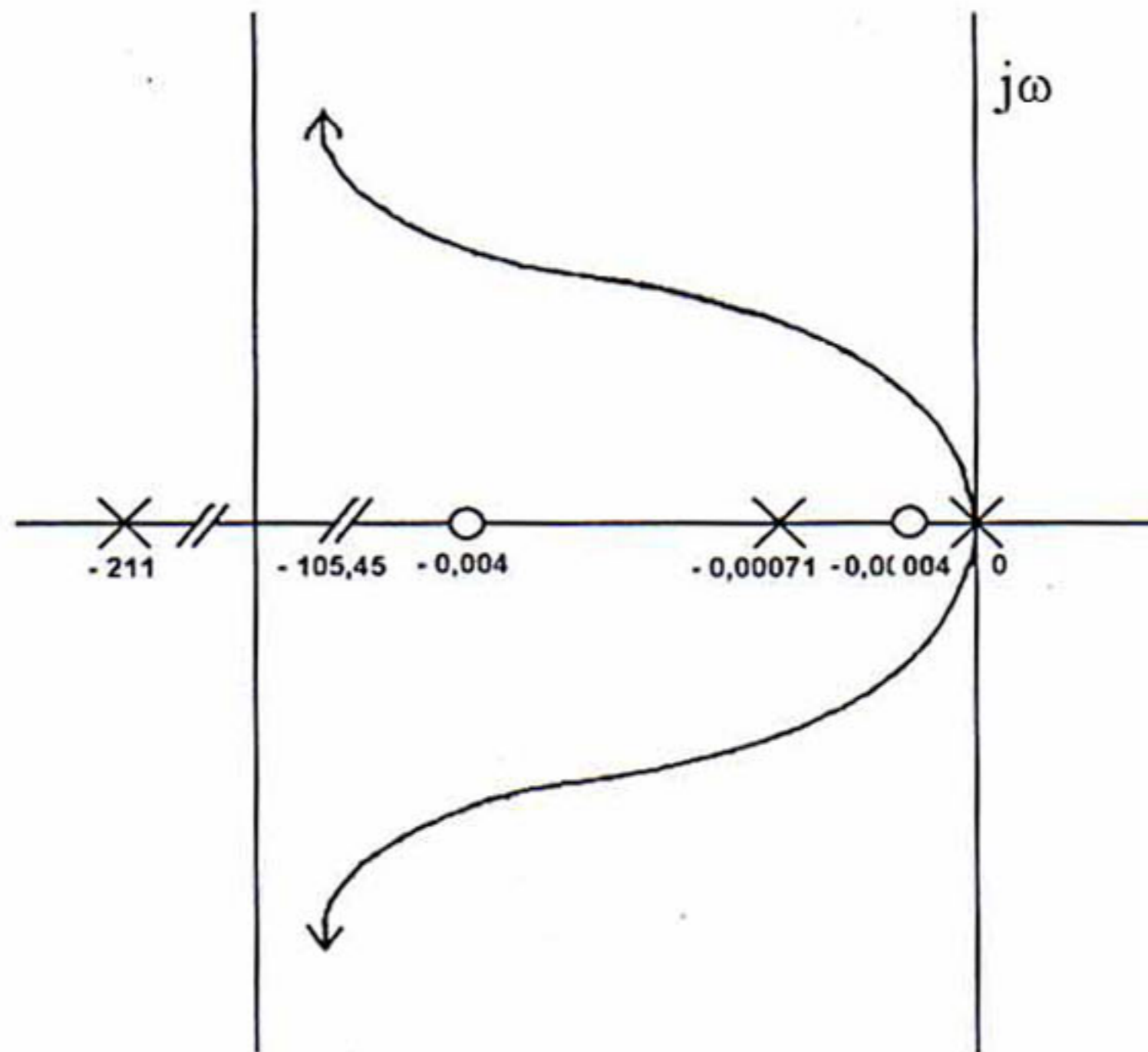
### Analisis kestabilan dengan metode Root Locus

Apabila penguatan pada persamaan (21) dinyatakan dengan K, maka persamaan tersebut berbentuk :

$$K_R G_R(s) F(s) B(s) = \frac{K (s + 0,094)(s + 0,00004)}{s^2 (s + 211)(s + 0,00071)} \quad (26)$$

Diagram Root Locus untuk persamaan di atas dinyatakan pada Gambar 6 di bawah ini.





Gambar 6. Diagram Root Locus sistem teras reaktor TRIGA 2000 Bandung

Pada Gambar 6 di atas terlihat bahwa, semua *pole* dan *zero* terletak di sebelah kiri sumbu khayal. Tempat kedudukan akar tidak memotong sumbu khayal, dengan demikian sistem stabil berapapun nilai penguatannya. Dengan adanya *pole* rangkap  $s = 0$ , maka sistem mempunyai kesalahan mantap sama dengan nol untuk masukan yang berbentuk *ramp*.

## KESIMPULAN

Dari hasil evaluasi data penelitian dengan menggunakan metode Nyquist, diagram Bode dan metode Root Locus, dapat disimpulkan bahwa reaktor TRIGA 2000 Bandung mempunyai tanggapan suhu akibat perubahan reaktivitas yang stabil dan baik berdasarkan kriteria-kriteria berikut :

1.  $(\alpha_f/\alpha_w) = 1,54 < [(U_w/U_f) + (U_w/h_c)(r - \lambda)] = 14 \times 10^6$



## 2. Metode Nyquist

Sistem stabil untuk seluruh daerah frekuensi. Semakin besar energi mayoritas neutron dalam teras reaktor, maka stabilitas sistem semakin berkurang.

## 3. Diagram Bode

Reaktor mempunyai stabilitas dan tanggapan transien yang baik dengan :

$$\text{Phase margin} = 41^{\circ}$$

$$\text{Gain margin} = 65 \text{ db}$$

## 4. Metode Root Locus

Sistem stabil dan mempunyai kesalahan mantap sama dengan nol untuk masukan yang berbentuk *ramp*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Atas bantuan staf dan teknisi Fisika dan Teknologi Reaktor, penulis mengucapkan terima kasih

## DAFTAR PUSTAKA

1. Safety Analysis Report for Upgrade of Triga Mark II Reactor at Centre for Nuclear Techniques Research Bandung-Indonesia, General Atomic, 1996
2. KATSUHIKO, OGATA, "Modern Control Engineering", Prentice Hall. Inc, New Delhi, 1984
3. SCHULT, M.A., "Control of Nuclear and Power Plant", Mc Graw-Hill Book Company Inc, 1961