

## SIMULASI REAKTOR SUR-100 BERDAYA NOL DENGAN MENGUNAKAN PROGRAM TUTSIM DAN FANSIM

Sudjatmi K.A, Dudung A.R.

Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

### ABSTRAK

SIMULASI REAKTOR SUR-100 BERDAYA NOL DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAM TUTSIM DAN FANSIM. Karakteristik dinamis dari reaktor SUR-100 yang beroperasi pada daya rendah telah disimulasikan. Pada kondisi ini, pengaruh temperatur dan xenon terhadap reaktivitas dapat diabaikan. Model matematis sistem reaktor dimasukkan ke dalam program TUTSIM, kemudian data dalam daerah frekuensi dianalisis dengan program FANSIM.

### ABSTRACT

THE SIMULATION OF ZERO-POWERED-SUR-100 REACTOR WITH TUTSIM AND FANSIM PROGRAM. The dynamic characteristics of SUR-100 reactor operating in low power has been simulated. In this condition, the temperature and xenon effect of reactivity is negligible. The mathematical model of reactor system fed in the TUTSIM program. Then the data is analyzed in frequency domain with the FANSIM program.

### PENDAHULUAN

Simulasi adalah sarana untuk penelitian hubungan besaran fisis suatu sistem dalam suatu waktu tertentu. Bila model sistem telah tersusun dalam persamaan matematis maka komputer dapat dipergunakan untuk mengamati tingkah laku sistem tersebut tanpa harus membuat lebih dulu sistemnya. Keuntungan simulasi dengan mempergunakan komputer adalah :

- Penampilan sistem dapat diamati padasemua keadaan.
- Hasil penampilan sistem lapangan dapat diekstrapolasikan dengan membuat peniruan dengan model untuk keperluan peramalan.
- Keputusan - keputusan yang berkaitan dengan masa depan pada tingkat konseptual dapat pula ditinjau dan diamati.
- Uji coba sistem dapat dilakukan dengan lebih cepat.
- Biaya lebih murah dibandingkan dengan membuat sistem itu sendiri.
- Penelaahan sistem secara hipotetis dapat dilakukan, yang pada keadaan sesungguhnya tidak dapat dilakukan.
- Simulasi dengan komputer adalah cara yang aman dan dapat diterima untuk menganalisis sistem.

Dalam mempelajari fungsi pindah suatu reaktor, di sini dibatasi oleh suatu diagram blok yang cukup sederhana, dimana reaktor hanya

sebagai media pengali yang berhubungan dengan besaran  $\rho$ ,  $\beta$ ,  $l$ , dan  $n$ . Pembatasan masalah dalam studi awal simulasi reaktor ini digunakan data-data dari reaktor berdaya sangat rendah yaitu reaktor SUR-100 (Siemens-Unterrichts-Reactor) yang dapat menghasilkan daya 100 mW, sehingga pengaruh temperatur dan xenon terhadap reaktivitas dapat diabaikan. Besaran-besaran yang disebutkan di atas dapat diukur lebih dulu dan selanjutnya dengan perhitungan yang berhubungan dengan reaktor dapat ditentukan. yang lain dianggap nol.

Persamaan diferensial dari reaktor kemudian diselesaikan dengan paket program TUTSIM, sedangkan sinyal data hasilnya diproses dengan paket program FANSIM. Hasil simulasi reaktor SUR 100 dengan program TUTSIM dan FANSIM memberikan gambaran respon waktu dan rapat neutron dengan reaktivitas sebagai parameter, dan daerah kestabilan reaktor dapat diketahui dari respon frekuensi.

### BAHAN DAN TATA KERJA

*Reaktor SUR-100 (Siemens-Unterrichts-Reactor)*

SUR-100 adalah reaktor termis dengan inti yang homogen dan padat, serta menghasilkan daya 100 mW.

Data-data reaktor SUR-100 adalah sbb :

Tipe reaktor : termis, padat-homogen  
 Bahan bakar :  $U_3O_8$ , pengayaan 20% U-235  
 Moderator : polyethylen (homogen dengan  $U_3O_8$ )  
 Inti reaktor : silinder (Dia. 24 cm, tinggi 26 cm)  
 Batang kendali : cadmium 2 buah  
 Sumber neutron : 10 mCi-Radium-Berilyum  
 Daya : 100 mW  
 Kerapatan fluks :  $6.10^6$  Neutron /cm<sup>2</sup> detik neutron termis maks.  
 Reaktivitas : 0,6 \$ / buah batang kendali  
 Koeff. temperatur: - 0,034 / °C  
 Umur prompt. :  $4.10^{-5}$  detik neutron

**Kinetika reaktor**

Secara pendekatan distribusi ruang kerapatan neutron dalam inti reaktor dapat digambarkan melalui persamaan titik kinetika reaktor :

$$\frac{dn}{dt} = n(\rho - \beta) / l + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = (\beta_i / l) n_i - \lambda_i C_i \quad (2)$$

- $\beta = \sum \beta_i$
  - $n$  = kerapatan neutron (cm<sup>-3</sup>)
  - $\rho$  = reaktivitas
  - $C_i$  = konsentrasi isotop induk neutron kasip grup i (cm<sup>-3</sup>)
  - $\beta_i$  = bagian neutron kasip grup i
  - $\lambda_i$  = konstanta paruh neutron kasip grup i (detik<sup>-1</sup>)
- Persamaan (1) dapat diartikan sebagai berikut :
- $dn/dt$  = perubahan kerapatan neutron/waktu
  - $(\rho/l)n$  = neutron yang dihasilkan melalui pembelahan
  - $-(\beta/l)n$  = neutron yang dipertahankan (neutron lambat)
  - $\sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i$  = neutron kasip yang timbul

Semua neutron, yang timbul karena proses pembelahan, dilepaskan spontan dan berumur l. Umur neutron l adalah waktu rata-rata antara dua generasi neutron yang berurutan. Tetapi kenyataannya, sebagian kecil dari neutron yang dihasilkan karena proses pembelahan, tidak langsung dihasilkan pada saat proses

pembelahan terjadi yaitu sebagai neutron serempak, melainkan dilahirkan setelah mengalami proses peluruhan beberapa isotop hasil pembelahan tertentu, yaitu sebagai neutron kasip.

Bagian dari neutron kasip ini tergantung dari bahan yang terbelah.

Sebagai contoh : U-235 menghasilkan ± 0,7% neutron kasip dari seluruh neutron yang diha-

Tabel 1. Sifat-sifat neutron kasip yang ditimbulkan akibat terbelahnya  $U_{235}$

Umur neutron rata-rata $t_i$ (detik)	Konstanta paruh $\lambda_i$ (detik <sup>-1</sup> )	Bagian dari seluruh jumlah neutron $\beta_i$
0,332	3,0100	0,00027
0,880	1,1400	0,00074
3,320	0,3010	0,00253
8,940	0,1110	0,00125
32,800	0,0305	0,00140
80,400	0,0124	0,00021

silkan (Tabel 1).

Kondisi suatu reaktor didefinisikan oleh faktor pengali k, k=1 dapat disebut sebagai reaktor kritis, k < 1 di bawah kritis dan k > 1 di atas kritis. Faktor pengali dapat juga didefinisikan sebagai hubungan jumlah neutron generasi tertentu dibagi jumlah neutron generasi sebelumnya.

Besaran k diberikan sebagai faktor pengali untuk reaktor yang tak terhingga besarnya. Untuk reaktor terhingga atau untuk reaktor normal digunakan faktor pengali  $k_{eff}$  (k efektif),

$$\rho = (k_{eff} - 1) / k_{eff}$$

**Teknik pengaturan.**

Teknik pengaturan dilaksanakan berdasarkan pada teknik umpan balik dan analisis sistem secara linier serta memadukan konsep-konsep teori jaringan. Suatu sistem pengaturan adalah suatu hubungan timbal balik antara komponen - komponen yang membentuk suatu konfigurasi sistem yang memberikan hasil yang dikehendaki. Hasil ini dinamakan respon sistem. Sedangkan dasar untuk menganalisis suatu sistem adalah landasan yang diberikan oleh teori sistem linier, yang menganggap ada-

nya hubungan linier antara sebab dan akibat suatu sistem.

Untuk memahami sistem pengaturan yang rumit, maka lebih dulu harus didapatkan model matematisnya yang bersifat kuantitatif. Karena itu adalah perlu untuk menggunakan hubungan antara variabel sistem dan model matematisnya. Karena sistem yang ditinjau berada dalam keadaan dinamis, berubah-ubah, persamaan yang melukiskannya adalah persamaan differensial. Untuk menangani persoalan-persoalan tersebut, secara ringkas dapat diikuti cara-cara tersebut di bawah ini:

Tentukan sistem dan bagian-bagiannya.

- Rumuskan model matematisnya dan susunlah asumsi-asumsi yang perlu.
- Tuliskan persamaan differensial yang menggambarkan cara kerja sistem.
- Selesaikanlah persamaan untuk variabel keluaran yang dikehendaki.
- Periksa hasil penyelesaian - penyelesaian itu dan pengandaian yang dipakai, lalu
- Analisa kembali.

Suatu pendekatan yang sangat praktis untuk menganalisis suatu sistem ialah dengan cara respon frekuensi. Tanggapan frekuensi suatu sistem didefinisikan sebagai respon keadaan mantap sistem tersebut terhadap sinyal masukan sinusoidal. Sinusoidal adalah masukan yang unik, dan sinyal keluaran yang dihasilkannya untuk sistem linier adalah juga sinusoidal dalam keadaan mantap yang berlainan bentuknya dari gelombang yang pertama hanya pada amplitudo dan sudut fasenya. Salah satu keuntungan dari cara respon frekuensi ini ialah tersedianya sinyal penguji dalam praktek untuk berbagai frekuensi dan amplitudo. Karena itu penentuan eksperimentasi untuk respon frekuensi dapat dengan mudah diperoleh, dan merupakan cara yang paling dapat diandalkan dan tidak rumit untuk menganalisis sistem secara eksperimental.

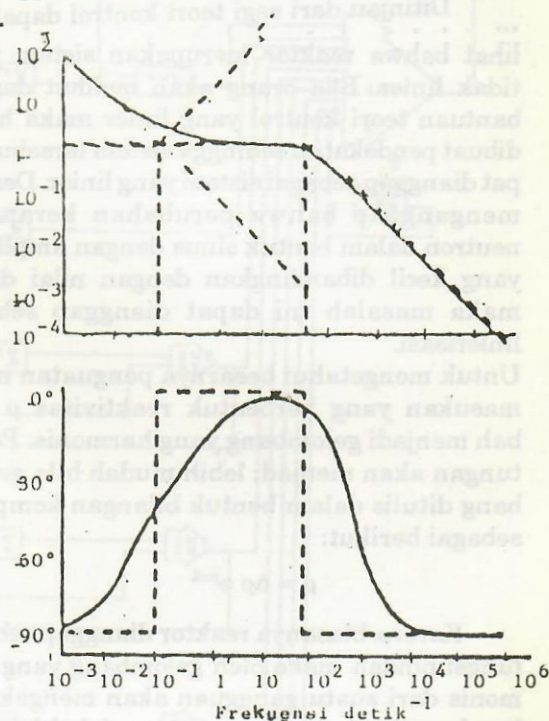
Pada percobaan ini sebagai keluaran mula-mula ditentukan bahwa reaktor beroperasi pada daya tertentu dengan reaktivitas awal sama dengan nol. Dengan menggerakkan batang pengendali maka reaktivitas dirubah sesuai dengan fungsi sinus yang merupakan fungsi waktu.

$$\rho = a \sin \omega t \quad (6)$$

Setelah terjadi perubahan reaktivitas maka kerapatan neutron dalam reaktor juga berbentuk sinus dengan harga dasar  $n_0$ .

$$n = n_0 + b \sin(\omega t + \phi) \quad (7)$$

Dari hubungan  $b/a$  dan pergeseran fase  $\phi$  yang merupakan fungsi frekuensi, dapat diketahui besarnya amplitudo dan sistem fase tersebut, sehingga dapat diketahui kestabilan dari sistem.



Gambar 1. Perubahan amplitudo dan fase pada reaktor tanpa pengaruh umpan balik dengan  $l = 10^{-5}$  detik

Dalam teknik kontrol, garis-garis lurus yang digambarkan dalam diagram Bode (Gambar 1) dapat diartikan sbb:

Penurunan penguatan terhadap frekuensi pada frekuensi rendah merupakan hubungan integral. Perubahan amplitudo suatu pengatur integral dalam diagram Bode dapat dilihat sebagai garis lurus dengan kenaikan -1.

Pengatur diferensial orde satu dalam diagram Bode digambarkan sebagai garis horisontal dengan gradien +1. Garis patah-patah pada Gambar 1 mula-mula turun dengan naiknya frekuensi. Mula-mula besarnya amplitudo konstan dari frekuensi  $\omega_1$  sampai  $\omega_2$ , dan di sini garis mulai turun lagi. Untuk menampilkan proses ini dalam diagram Bode, maka garis yang dibentuk oleh pengatur integral di-

jumlahkan dengan garis lurus yang dibentuk oleh pengatur differensial, dimulai dari frekuensi  $\omega_1$ .

Untuk menggambarkan penurunan penguatan pada frekuensi tinggi, harus ditambahkan kembali penguatan yang dihasilkan oleh pengatur differensial. Oleh sebab itu timbul kembali garis patah-patah dengan sudut tertentu pada frekuensi  $\omega_2$ .

Ditinjau dari segi teori kontrol dapat dilihat bahwa reaktor merupakan sistem yang tidak linier. Bila orang akan melihat dengan bantuan teori kontrol yang linier maka harus dibuat pendekatan sehingga sistem tersebut dapat dianggap sebagai sistem yang linier. Dengan menganggap bahwa perubahan kerapatan neutron dalam bentuk sinus dengan amplitudo yang kecil dibandingkan dengan nilai dasar, maka masalah ini dapat dianggap sebagai linierisasi.

Untuk mengetahui besarnya penguatan maka masukan yang berbentuk reaktivitas  $\rho$  diubah menjadi gelombang yang harmonis. Perhitungan akan menjadi lebih mudah bila gelombang ditulis dalam bentuk bilangan kompleks sebagai berikut:

$$\rho = \Delta\rho e^{j\omega t} \quad (8)$$

Karena biasanya reaktor dianggap sebagai fungsi pindah maka oleh gelombang yang harmonis dari suatu gangguan akan mengakibatkan bergelombangnya semua variabel lainnya, misalnya kerapatan neutron  $n$  atau konsentrasi  $C_i$  isotop penghasil neutron kasip dengan frekuensi yang sama seperti pada gangguan.

Untuk kedua besaran itu dapat dituliskan :

$$n = n_0 + \Delta n e^{j\omega t} \quad (9)$$

$$C_i = C_{i0} + \Delta C_i e^{j\omega t} \quad (10)$$

Dalam rumus ini pergeseran fase ditulis tidak eksplisit.

Secara linier, persamaan diatas dapat ditulis :

$$j\omega\Delta n = (n_0/l)\Delta\rho - j\omega \sum_{i=1}^6 \Delta C_i \quad (11)$$

$$j\omega\Delta C_i = (\beta_i/l)\Delta n - \lambda_i\Delta C_i \quad (12)$$

Dari persamaan ini dapat dituliskan persamaan penguatan hubungan sebab akibat reaktor tanpa pengaruh umpan balik.

$$Fr(\omega) = \Delta n/\Delta\rho = (n_0/l) / (1 + \sum_{i=1}^6 (\beta_i / (\lambda_i + j\omega))) \quad (13)$$

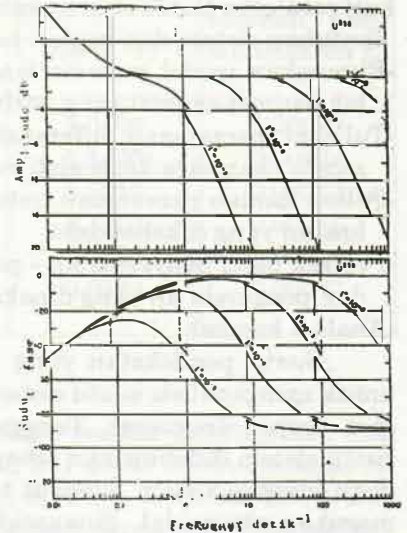
$\Delta n$  = amplitudo gelombang harmonis disekitar harga dasar  $n_0$

$\Delta\rho$  = perubahan reaktivitas yang kecil, dimana besarnya amplitudo gelombang harmonis sekitar harga dasar nol.

$l$  = umur serentak neutron rata-rata

$\beta_i$  = bagian dari neutron kasip

$\lambda_i$  = konstanta pembelahan isotop penghasil neutron kasip



Gambar 2. Perubahan amplitudo dan fase pada reaktor tanpa pengaruh umpan balik untuk bermacam-macam umur serentak neutron bahan belah U-235.

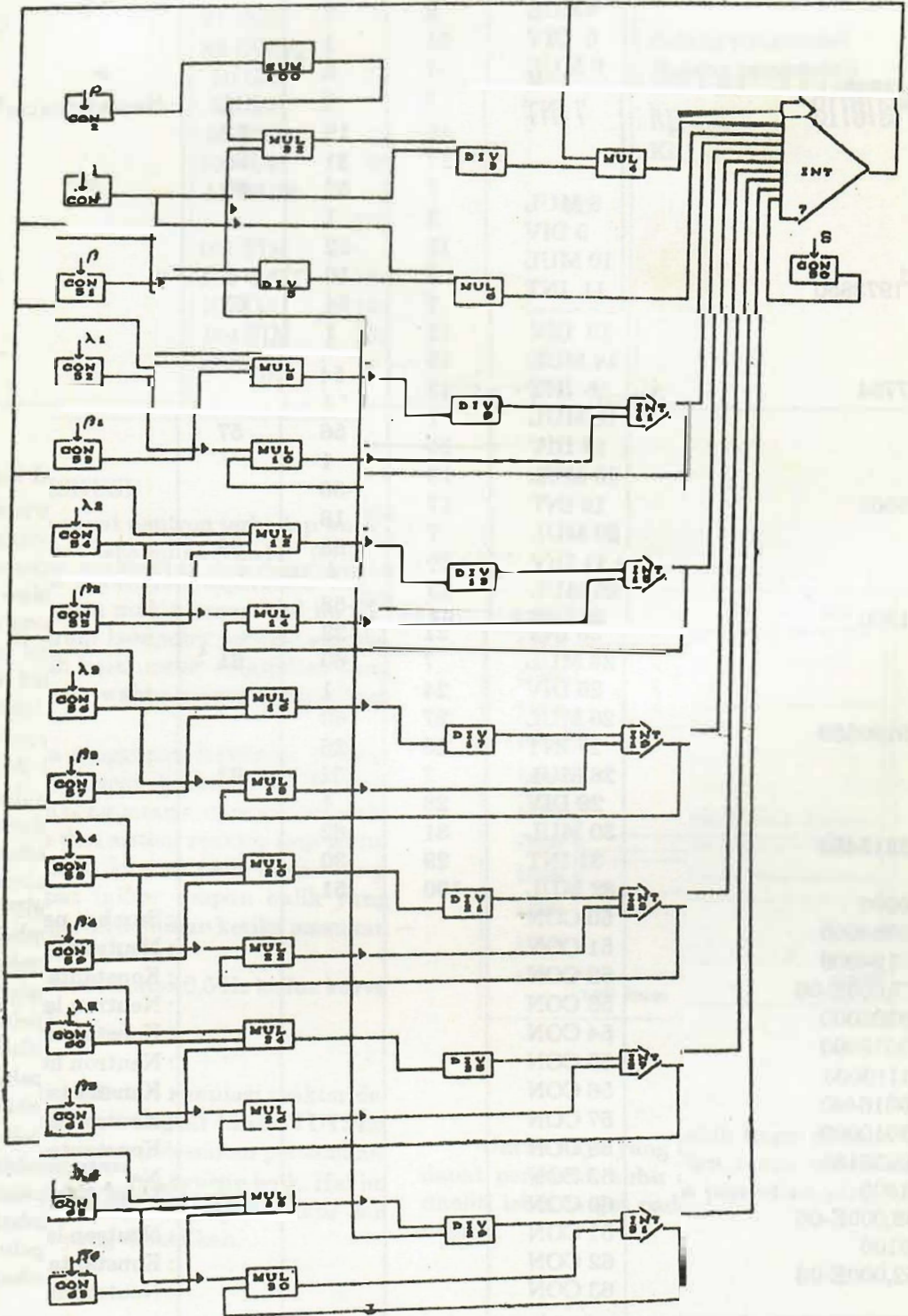
$\beta$  = jumlah  $\beta_i$  dari  $\beta_1$  sampai  $\beta_6$

Gambar 2 menunjukkan harga dan penguatan fase  $(\Delta n/\Delta\rho)(\beta/n_0)$  bahan belah U-235 dalam grafik logaritmis bermacam-macam harga umur serentak neutron rata-rata.

Dalam hal ini dapat dilihat, bahwa reaktor yang dilinierkan pada frekuensi yang sangat kecil menunjukkan hubungan integrasi. Harga pada kurva pengatur integral digambarkan sebagai garis lurus dalam grafik logaritmis, yang berjalan dari kiri atas ke kanan bawah. Sedangkan penguatan didasarkan pada kestabilan.

*Diagram persamaan dasar (kinetika reaktor).*

Dengan mempergunakan bahasa yang diperlukan program TUTSIM dan FANSIM maka persamaan di atas dapat diubah menjadi diagram sebagai berikut :



Program dengan perangkat lunak TUTSIM dan FANSIM.

Model :						: Umur neutron (detik)
40,000E-06	1 CON					: Reaktivitas
0,0000	2 CON					
	3 DIV	32	1			
	4MUL	3	7			
	5 DIV	51	1			
	6 MUL	-7	5			
0,0376710	7 INT	4	6	11		: Neutron (n/cm <sup>3</sup> )
		15	19	23		
		27	31	50		
	8 MUL	7	52	53		
	9 DIV	8	1			
0,1973850	10 MUL	11	-52			
	11 INT	9	10			
	12 MUL	7	54	55		
	13 DIV	12	1			
1,7754	14 MUL	15	-54			
	15 INT	13	14			
	16 MUL	7	56	57		
	17 DIV	16	1			
	18 MUL	19	-56			
1,5663	19 INT	17	18			
	20 MUL	7	58	59		
	21 DIV	20	1			
	22 MUL	23	-58			
3,1300	23 INT	21	22			
	24 MUL	7	60	61		
	25 DIV	24	1			
	26 MUL	27	-60			
0,9100550	27 INT	25	26			
	28 MUL	7	62	63		
	29 DIV	28	1			
	30 MUL	31	-62			
0,3315480	31 INT	29	30			
	32 MUL	100	51			
0,0000	50 CON					: Sumber neutron (n/cm <sup>3</sup> )
0,0084000	51 CON					: Neutron lambat
0,0124000	52 CON					: Konstanta peluruhan
277,000E-06	53 CON					: Neutron lambat
0,0305000	54 CON					: Konstanta peluruhan
0,0018990	55 CON					: Neutron lambat
0,1110000	56 CON					: Konstanta peluruhan
0,0016460	57 CON					: Neutron lambat
0,3010000	58 CON					: Konstanta peluruhan
0,0033180	59 CON					: Neutron lambat
1,1400	60 CON					: Konstanta peluruhan
966,000E-06	61 CON					: Neutron lambat
3,0100	62 CON					: Konstanta peluruhan
352,000E-06	63 CON					: Neutron lambat

0,0376710	75 CON					
	76 SUM	7	-75			
	77 DIV	76	7			
0,0000	79 REL	81	120	120	:relay	
0,0000	80 REL	120	120	82	: relay	
		93				
-0,0500000	81 CON				:	
0,0500000	82 CON				: Batang pengendali	
1,0000	90 GAI	77			: Batang pengendali	
0,0000	91 GAI	77			: K <sub>p</sub>	
0,0000	92 EUL	91			: Ki	
	93 SUM	90	92			
	100SUM	2	79	80		
		102				
	101 TIM					
0,0500000	102 GAI	104				
0,0000	102 GAI	101				
	104 SIN	103				
0,0000	120CON					

## HASIL DAN DISKUSI

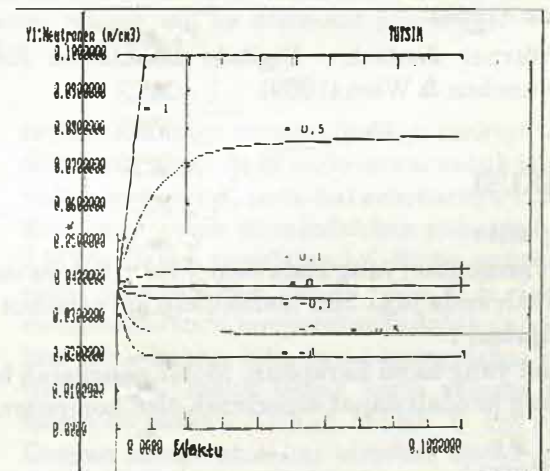
Dari kurva rapat neutron terhadap waktu dengan reaktivitas sebagai parameter, terlihat bahwa bilamana reaktivitas diperbesar maka konstanta waktunya makin besar. Hal ini menunjukkan program komputer sebagai simulator berjalan lebih baik untuk reaktivitas yang lebih besar karena waktu resolusi (sampling) lebih memadai.

Dari kurva tanggapan frekuensi terlihat bahwa untuk frekuensi di bawah 0,5 Hz terdapat perbedaan penguatan antara sistem reaktor *loop* terbuka dan sistem reaktor *loop* tertutup. Ini disebabkan karena pada sistem *loop* tertutup terdapat faktor umpan balik yang mempunyai pengaruh dominan ketika masukan frekuensi di bawah 0,5 Hz.

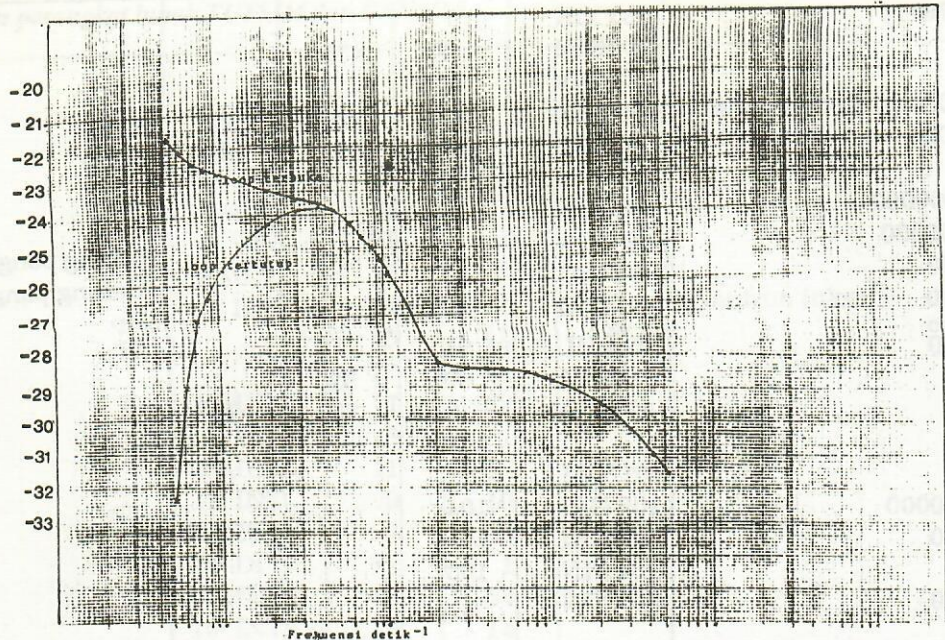
Untuk frekuensi di atas 0,5 Hz kedua kurva hampir berimpit.

## KESIMPULAN

Pada studi awal dari simulasi reaktor dengan daya rendah, perangkat lunak TUTSIM dan FANSIM dapat menyelesaikan persamaan kinetika reaktor titik dengan baik. Hal ini dapat dilihat dari diagram respon waktu dan respon frekuensi yang dihasilkan.



Untuk daya yang lebih tinggi dimana terdapat pengaruh suhu dan racun xenon akan diteliti lebih lanjut pada penelitian yang akan datang.



#### DAFTAR PUSTAKA

1. Geoffrey Gordon , Systemsimulation, R.Oldenbourg Verlag Munchen & Wien (1972).
2. M.A.Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plans, Mc. Graw-Hill Book Company Inc. (1961).
3. Werner Jentsch, Digitale Simulation Kontinuerlicher Systeme, R. Oldenbourg Verlag Munchen & Wien (1969).

#### DISKUSI

##### Setyadi :

Dari presentasi yang anda sampaikan, bahwa daya reaktor 100 mWatt dan dilakukan di Jerman. Apakah anda juga bisa melakukan hal tersebut di PPTN, dan apakah hambatannya.

##### Sudjatmi :

Itulah yang kami harapkan. Motor penggerak batang kendali harus dibuat lebih dulu sehingga batang kendali dapat diperintah oleh komputer.

##### Budiono :

1. Gambar orang yang ditayangkan  $\rightarrow$  sistem manual, tetapi yang konvensional adalah sistem kontrol otomatis yang menggerakkan P.I, P.I.D. dan lain-lain dengan cara analog.

2. Bagaimana cara menghubungkan komputer dengan batang kendali ? Apakah sistem kontrol yang menggunakan 2 relai tidak on-off ? Bagaimana hubungan P.I.D. dengan relai ?

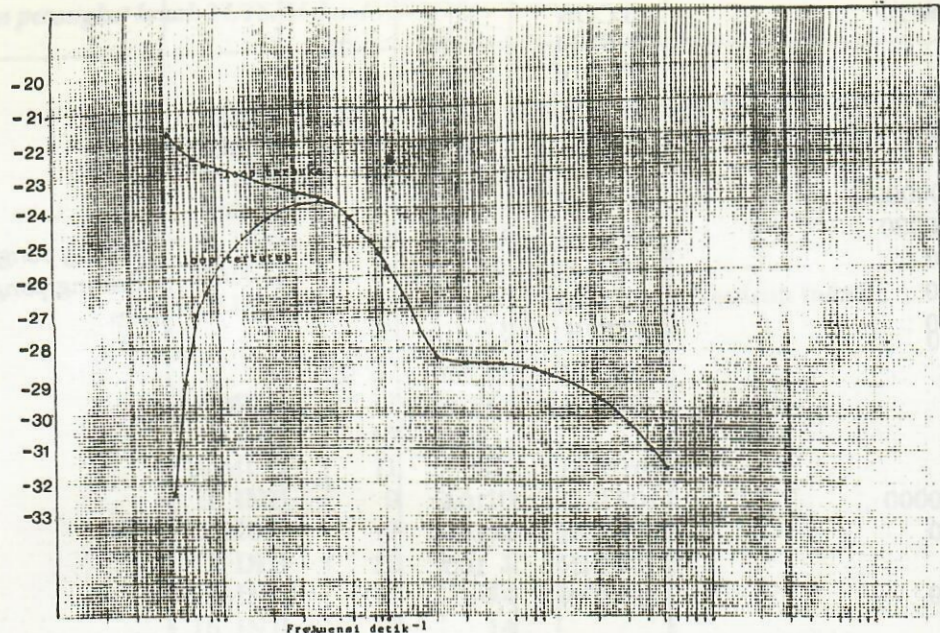
3. Respons yang menggunakan kontroler tersebut selalu ada *offset*, apa benar hasil yang ditayangkan ? Saudara menggunakan paket program, kemudian buat percobaan, apakah tidak lebih baik dibuktikan dengan perhitungan secara teori respons tersebut ?

##### Sujatmi :

2. Dengan melalui *interface* (A/D dan D/A), batang kendali dihubungkan dengan komputer. Pada dasarnya P.I.D. berjalan terus tanpa memerlukan *on/off* atau relai. Tapi disini *on/off* atau relai digunakan untuk membatasi kerja P.I.D. Untuk gangguan yang sangat kecil (pada batas yang diberikan untuk *on*) relai tidak *on*, sehingga P.I.D. tidak berfungsi.

3. Benar. Kalau anda berminat untuk membuktikan dengan perhitungan, silahkan !





#### DAFTAR PUSTAKA

1. Geoffrey Gordon , Systemsimulation, R.Oldenbourg Verlag Munchen & Wien (1972).
2. M.A.Schultz, Control of Nuclear Reactors and Power Plans, Mc. Graw-Hill Book Company Inc. (1961).
3. Werner Jentsch, Digitale Simulation Kontinuerlicher Systeme, R. Oldenbourg Verlag Munchen & Wien (1969).

#### DISKUSI

##### Setyadi :

Dari presentasi yang anda sampaikan, bahwa daya reaktor 100 mWatt dan dilakukan di Jerman. Apakah anda juga bisa melakukan hal tersebut di PPTN, dan apakah hambatannya.

##### Sudjatmi :

Itulah yang kami harapkan. Motor penggerak batang kendali harus dibuat lebih dulu sehingga batang kendali dapat diperintah oleh komputer.

##### Budiono :

1. Gambar orang yang ditayangkan  $\rightarrow$  sistem manual, tetapi yang konvensional adalah sistem kontrol otomatis yang menggerakkan P.I, P.I.D. dan lain-lain dengan cara analog.
2. Bagaimana cara menghubungkan komputer dengan batang kendali ? Apakah sistem kontrol yang menggunakan 2 relai tidak *on-off* ? Bagaimana hubungan P.I.D. dengan relai ?
3. Respons yang menggunakan kontroler tersebut selalu ada *offset*, apa benar hasil yang ditayangkan ? Saudara menggunakan paket program, kemudian buat percobaan, apakah tidak lebih baik dibuktikan dengan perhitungan secara teori respons tersebut ?

##### Sujatmi :

2. Dengan melalui *interface* (A/D dan D/A), batang kendali dihubungkan dengan komputer. Pada dasarnya P.I.D. berjalan terus tanpa memerlukan *on/off* atau relai. Tapi disini *on/off* atau relai digunakan untuk membatasi kerja P.I.D. Untuk gangguan yang sangat kecil (pada batas yang diberikan untuk *on*) relai tidak *on*, sehingga P.I.D. tidak berfungsi.
3. Benar. Kalau anda berminat untuk membuktikan dengan perhitungan, silahkan !