

PENENTUAN DAN ANALISIS GANGGUAN REAKTIVITAS PENYERAP LEMAH PADA PUSAT TERAS REAKTOR DENGAN TEORI GANGGUAN

Widarto*, Bambang Sumarsono*, Abu Bahri**

* Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta - Badan Tenaga Atom Nasional
** Jurusan Teknik Nuklir - Universitas Gadjah Mada

ABSTRAK

PENENTUAN DAN ANALISIS GANGGUAN REAKTIVITAS PENYERAP LEMAH PADA PUSAT TERAS REAKTOR DENGAN TEORI GANGGUAN. Telah dilakukan percobaan penentuan gangguan reaktivitas penyerap lemah dengan menyisipkan cuplikan Al dan Pb ke dalam teras reaktor sebagai simulasi gangguan. Sebagai pembanding dilakukan pula perhitungan secara teoritis dengan teori satu kelompok. Tujuan percobaan ini khususnya untuk mengetahui sejauh mana gangguan reaktivitas penyerap lemah pada saat reaktor kritis dan stabil pada daya tertentu. Dengan berat Al 45 gram, diperoleh harga reaktivitas sebesar -2 sen dari percobaan dan -1,86 sen dari perhitungan dengan ralat 7%. Untuk berat Pb 190 gram, diperoleh harga reaktivitas sebesar -0,8 sen dari percobaan dan -0,75 sen dari perhitungan dengan ralat 6,25%. Dari hasil percobaan dan perhitungan tersebut diperoleh ralat yang relatif kecil, sehingga dengan metode ini dapat digunakan untuk estimasi besarnya gangguan reaktivitas terhadap perubahan tingkat daya reaktor khususnya dalam eksperimen dan penggunaan reaktor riset.

ABSTRACT

DETERMINATION AND ANALYSIS OF LOW PERTURBATION REACTIVITY ON REACTOR CORE USING PERTURBATION THEORY. Determination and calculation of low perturbation reactivity by inserting Al and Pb as perturbation simulation has been reported. For 45 gram weight of Al it was found the perturbation reactivity is -2 cent by experiment and -1.86 cent by calculation with accuracy of 7%. For 190 gram weight of Pb was found the perturbation reactivity is -0.8 cent by experiment and -0.75 cent by calculation with accuracy 6.25%. The purpose of the analysis is particularly to observe the value of perturbation reactivity of weak absorber to the criticality. Furthermore, this method can be used to estimate the perturbation reactivity in the use of research reactor.

PENDAHULUAN

Selama reaktor dioperasikan baik reaktor riset ataupun reaktor daya, perlu dilakukan analisis untuk memperhitungkan efek yang timbul akibat terjadinya suatu gangguan reaktivitas oleh karena pengaruh perubahan geometri atau komposisi teras reaktor. Dengan adanya gangguan reaktivitas dalam reaktor akan mengakibatkan perubahan keseimbangan antara kecepatan produksi dan kecepatan hilangnya neutron selama reaktor dioperasikan. Suatu reaktor biasanya memiliki harga reaktivitas negatif sehingga cenderung mengurangi populasi neutron dalam teras. Penyebab gangguan reaktivitas tersebut dapat merupakan gangguan yang bersifat disengaja ataupun tidak disengaja. Gangguan yang disengaja misalnya penyisipan batang kendali untuk mengubah populasi neutron atau daya reaktor dan penyisipan material asing ke dalam teras seperti yang biasa

dilakukan dalam percobaan pada reaktor riset umumnya. Sedangkan gangguan yang tidak disengaja misalnya proses susutan bahan bakar karena reaksi fisi, terbentuknya isotop Xenon (^{135}Xe) dan Samarium (^{140}Sm) yang bersifat sebagai racun neutron serta kenaikan suhu teras yang menyebabkan terjadinya reaktivitas negatif suhu pada saat reaktor dioperasikan. Pada permasalahan ini khususnya gangguan yang bersifat disengaja, dilakukan perhitungan dan percobaan gangguan reaktivitas reaktor dari bahan penyerap lemah yang disisipkan di dalam teras reaktor sebagai simulasi gangguan reaktivitas reaktor, dengan tujuan dapat memperkirakan gangguan reaktivitas baik secara kualitatif maupun kuantitatif berkaitan dengan keselamatan operasi reaktor. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan teori gangguan satu kelompok neutron dengan syarat gang-

bagai simulasi gangguan reaktivitas digunakan bahan penyerap lemah (Al dan Pb) yang disisipkan pada pusat teras reaktor dan fasilitas iradiasi Lazy Susan. Hasil pekerjaan ini diharapkan dapat digunakan sebagai bahan analisis khususnya dalam penggunaan reaktor riset.

DASAR TEORI

Pada saat reaktor dalam kondisi kritis, berlaku persamaan difusi satu kelompok neutron yang dapat ditulis dalam bentuk fungsi :

$$\nabla \cdot D \nabla \Phi + (v \Sigma_f - \Sigma_a) \Phi = 0 \quad (1)$$

dengan operator fungsi:

$M = \nabla \cdot D \nabla + v \Sigma_f - \Sigma_a$ di mana Σ_f dan Σ_a adalahampang lintang makroskopis fisi dan absorpsi, serta Φ dan D adalah fluks dan koefisien difusi neutron. Andaikan reaktor sedang dioperasikan dalam kondisi kritis mengalami gangguan reaktivitas oleh material asing yang tersisipkan dalam teras reaktor, maka akan memberikan perubahan terhadap besaran-besaran Σ_a , Σ_f dan D menjadi Σ'_a , Σ'_f dan D' yang secara matematis dapat ditulis:

$$\Sigma'_f = \Sigma_f + \delta \Sigma_f \longrightarrow \delta \Sigma_f = \Sigma'_f - \Sigma_f$$

$$\Sigma'_a = \Sigma_a + \delta \Sigma_a \longrightarrow \delta \Sigma_a = \Sigma'_a - \Sigma_a$$

$$D' = D + \delta D \longrightarrow \delta D = D' - D$$

Akibat dari gangguan tersebut reaktor akan mengalami perubahan dari keadaan kritis menjadi subkritis atau superkritis tergantung dari sifat gangguan reaktivitasnya. Jika reaktor terganggu tersebut kembali menjadi kritis dengan kondisi yang baru dengan anggapan bahwa ada perubahan harga $v \longrightarrow v'$ dan $\Phi \longrightarrow \Phi'$ maka persamaan kritis baru dapat ditulis:

$$\nabla \cdot D' \nabla \Phi' + (v' \Sigma'_f - \Sigma'_a) \Phi' = 0 \quad (3)$$

dengan operator gangguan

$M' = \nabla \cdot D' \nabla + (v' \Sigma'_f - \Sigma'_a)$. Untuk menyelesaikan persamaan kritis terganggu dengan operator fungsi, pertama dengan anggapan bahwa Σ_f dan Σ_a berubah sedang koefisien difusi D tetap ($\delta D = 0$) maka persamaan menjadi :

$$\nabla \cdot D \nabla \Phi' + (v' \Sigma'_f - \Sigma'_a) \Phi' = 0 \quad (4)$$

Bila perubahan reaktivitas gangguan didefinisikan sebagai :

$$\rho = - \frac{v' - v}{v} = - \frac{\Delta v}{v} \quad (5)$$

dan karena operator fungsi bersifat *self adjoint* dengan menganggap fluks neutron terganggu sama dengan fluks neutron sebelumnya ($\Phi' = \Phi$) maka hasil manipulasi matematik diperoleh harga perubahan reaktivitas sebagai berikut :

$$\rho_1 = \frac{\int_v (v \delta \Sigma_f - \delta \Sigma_a) \Phi^2 dV}{v \int_v \Sigma_f \Phi^2 dV} \quad (6)$$

dengan cara yang sama anggapan kedua adalah bila koefisien difusi berubah $D \longrightarrow D'$ dengan Σ_f dan Σ_a dianggap tetap ($\delta \Sigma_f$ dan $\delta \Sigma_a$ sama dengan nol) diperoleh bentuk penyelesaian :

$$\rho_2 = - \frac{\int_v \delta D (\nabla \Phi)^2 dV}{v \int_v \Sigma_f \Phi^2 dV} \quad (7)$$

Bila dianggap semua harga D , Σ_f dan Σ_a secara serentak berubah maka reaktivitas total $\rho = \rho_1 + \rho_2$. Pada daerah reflektor karena tidak ada bahan bakar maka Σ_f dan Σ_a sama dengan nol, sehingga gangguan reaktivitas untuk reaktor dengan reflektor ditulis :

$$\rho = \frac{1}{v \int_v \Sigma_f \Phi^2 dV} \left\{ \int_v [(v \delta \Sigma_f - \delta \Sigma_a) \Phi^2 - \delta D (\nabla \Phi)^2] dV - \int_{ref} [\delta \Sigma_a \Phi^2 + \delta D (\nabla \Phi)^2] dV \right\} \quad (8)$$

Persamaan (8) merupakan bentuk persamaan perubahan reaktivitas yang ditimbulkan oleh bahan penyerap lemah yang disisipkan dalam teras reaktor, dengan anggapan gangguan tersebut adalah kecil dan bersifat gangguan reaktivitas lokal. Jika rapat jenis bahan sebesar dx mempunyai volume sebesar l/dx untuk setiap gram berat disisipkan pada titik berjarak r dari pusat teras, maka akan terjadi gangguan terhadap parameter-parameter sebagai berikut:

$$\delta \Sigma_a = l/dx \Sigma_a \delta(r - r_0) \quad (9)$$

$$\delta D = l/dx D_p \delta(r - r_0) \quad (10)$$

Bila gangguan reaktivitas dievaluasi pada titik r_0 yang dapat dianggap sebagai gangguan lokal (non uniform) terhadap fluks neutron maka persamaan (8) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\rho(r_o) = -\frac{1}{d_o k} \{ (\Sigma_{ap} \Phi^2(r_o) + D_p [\nabla \Phi(r_o)]^2)_{teras} + (\Sigma_{ap} \Phi^2(r_o) + D_p [\nabla \Phi(r_o)]^2)_{refl.} \} \quad (11)$$

$k = \nu \int \Sigma_f \Phi^2 dV$ (integral seluruh volume reaktor); $\rho_D(r_o)$ = reaktivitas gangguan bahan penyerap lemah pada titik r_o , baik di daerah teras ataupun reflektor; dx = rapat jenis bahan penyerap lemah; Σ_{ap} = tampang lintang makroskopis bahan penyerap lemah; D_p = koefisien difusi bahan penyerap lemah. Untuk di pusat teras reaktor $r_o = 0$ maka $\nabla \Phi = 0$, sehingga persamaan (11) menjadi :

$$\rho(r_o) = -\frac{1}{d_x k} \{ \Sigma_{ap} \Phi^2(r_o) \} \quad (12)$$

Dalam keadaan kritis distribusi fluks neutron untuk reaktor homogen berbentuk silinder dengan tinggi ekstrapolasi H' dan jari-jari R dengan tebal reflektor b , berlaku syarat batas bahwa arus neutron antara teras dengan reflektor harus kontinu menurut persamaan kontinuitas :

$$-D_c \alpha \frac{J_1(\alpha R)}{J_0(\alpha R)} = d_r \beta$$

$$\frac{I_1(\alpha R) K_0[\beta(R+b)] + I_0[\beta(R+b)] K_1(\alpha R)}{I_0(\alpha R) K_0[\beta(R+b)] + I_0[\beta(R+b)] K_1(\alpha R)} \quad (13)$$

Untuk distribusi fluks, teras :

$$\Phi_c(r_o) = A J_0(\alpha r_o) \longrightarrow$$

$$\Delta \Phi_c(r_o) = -A \alpha J_1(\alpha r_o) \quad (14)$$

reflektor :

$$\Phi_r(r_o) = C L(r_o) \longrightarrow$$

$$\Delta \Phi_r(r_o) = C L'(r_o) \quad (15)$$

Substitusi persamaan (14) dan (15) terhadap (11) dapat ditulis menjadi :

$$\rho_D(r_o) = -\frac{1}{d_x k} \{ \Sigma_{ap} A^2 J_0^2(\alpha r_o) + D_p A^2 \alpha^2 J_1(\alpha r_o) \} + \{ \Sigma_{ap} C^2 L_r^2(r_o) +$$

$$D_p C^2 (L'_r(r_o))^2 \} \quad (16)$$

$$k = 1,804 MF A^2 [J_0^2(\alpha R) + J_1^2(\alpha R)]$$

$$L_r(r_o) = I_0(\beta r_o) K_0[\beta(R+b)] -$$

$$I_0[\beta(R+b)] K_0(\alpha r_o)$$

$$L'_r(r_o) = \beta I_1(\beta r_o) K_0[\beta(R+b)] +$$

$$\beta I_0[\beta(R+b)] K_1(\beta r_o)$$

$$C =$$

$$\frac{A J_0(\alpha R)}{I_0(\beta R) K_0[\beta(R+b)] - I_0[\beta(R+b)] K_0(\beta R)}$$

$$\beta = \frac{1}{L'_2} + \left(\frac{\pi}{H'} \right)^2$$

Selanjutnya untuk menentukan perubahan reaktivitas ρ_D oleh per gram bahan penyerap lemah yang disisipkan pada titik $r_o = 0$ secara teoritis dihitung dengan persamaan (16), sedang untuk menentukan harga α digunakan metode *trial* dan *error* persamaan kontinuitas (12).

CARA PERHITUNGAN

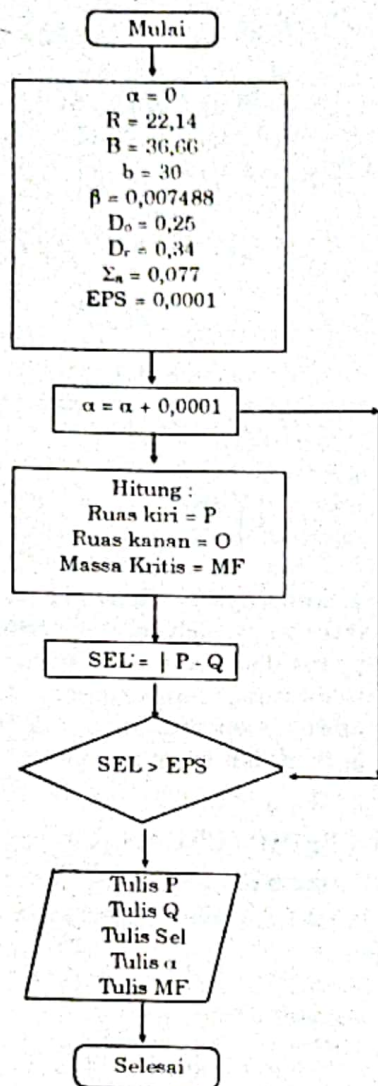
Persamaan (12) adalah persamaan kritis

Tabel 1. Data-data parameter untuk perhitungan

Tinggi ekstrapolasi teras	H'	= 36,66	cm
Jari-jari teras	R	= 22,14	cm
Massa kritis bahan bakar	MF	= 2246	gr
Koefisien difusi teras	D_c	= 0,25	cm
Tampang lintang teras	Σ_{ac}	= 0,077	cm ⁻¹
Koefisien difusi reflektor	D_r	= 0,84	cm
Tebal reflektor	b	= 30,00	cm
Fraksi neutron kasip efektif	β_{ef}	= 0,007	
Tampang lintang absorpsi Al	Σ_{a1}	= 0,0142	cm ⁻¹
Koefisien difusi Al			
Rapat jenis Al	D_1	= 3,4394	cm
Tampang lintang absorpsi Pb	d_1	= 2,699	g cm ⁻³
Koefisien difusi Pb	Σ_{a2}	= 0,0057	cm ⁻¹
Rapat jenis Pb	D_2	= 0,90625	cm
	d_2	= 11,34	g cm ⁻³

dengan syarat batas arus neutron kontinu pada batas teras dengan reflektor yang harus dipenuhi untuk reaktor homogen berbentuk silinder dengan jari-jari R dan tebal reflektor b . Per-

hitungan dilakukan dengan metode *trial and error* dari persamaan (12) untuk menentukan harga α , yang ditunjukkan pada *flow-chart* Gambar 1.



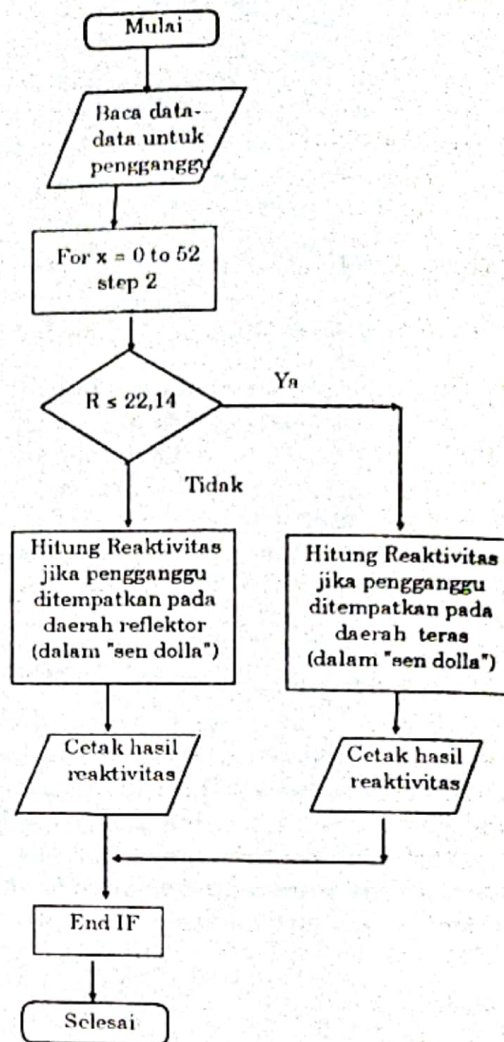
Gambar 1. *Flow-chart* metode *trial and error*

Hasil iterasi diperoleh harga $\alpha = 0,086 \text{ cm}^{-1}$ dengan ketelitian $\Delta\alpha = 0,0001$ dan $\beta = 7,488 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$. Selanjutnya perhitungan untuk menentukan reaktivitas gangguan penyerap lemah $\rho(r_0)$ dengan persamaan (16) ditunjukkan dengan *flow-chart* Gambar 2 dan hasilnya pada Tabel 2.

Pada Tabel 3 dan 4 dapat dilihat hasil perhitungan gangguan reaktivitas fungsi jarak dari pusat teras reaktor.

CARA PERCOBAAN

Cuplikan (Al dan Pb) ditimbang kemudian dibersihkan dengan cairan aseton. Reaktor dio-



Gambar 2. *Flow chart* reaktivitas bahan penyerap sebagai fungsi jarak radiasi dari pusat teras (x).

perasikan pada daya 100 kW. Pada kondisi daya reaktor telah stabil, cuplikan disisipkan pada pusat teras reaktor (Central Timble = CT) sebagai gangguan lokal (non uniform). Dilakukan pengamatan perubahan reaktivitas pada alat ukur *reactivity* komputer yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil perhitungan dan eksperimen penyisipan bahan penyerap lemah Al dan Pb

Bahan,	Posisi	Reaktivitas (sen)		Ralat (%)
		Perhitungan	Percobaan	
45 g, Al	0 (CT)	-1,86	-2,00	7,0
190 g, Pb	0 (CT)	-0,75	-0,80	6,25

Tabel 3. Perhitungan penyisipan timbal Pb.

Tampang lintang absorpsi = 0,0057/cm;
Koefisien difusi = 0,9063 cm;
Rapat jenis = 11,3400 g/cm;
Berat = 190.000 g

Jarak dari radial pusat teras (cm)	Reaktivitas (sen dolar)
0	- 0,7498
2	- 0,7452
4	- 0,7317
6	- 0,7097
8	- 0,6800
10	- 0,6436
12	- 0,6016
14	- 0,5555
16	- 0,5068
18	- 0,4570
20	- 0,4074
22	- 0,3595
24	- 0,0704
26	- 0,0575
28	- 0,0470
30	- 0,0384
32	- 0,0313
34	- 0,0254
36	- 0,0206
38	- 0,0166
40	- 0,0134
42	- 0,0108
44	- 0,0087
46	- 0,0071
48	- 0,0060
50	- 0,0051
52	- 0,0046

Tabel 4. Perhitungan penyisipan aluminium (Al)

Tampang lintang absorpsi = 0,0142/cm;
Koefisien difusi = 3,4394 cm;
Rapat jenis = 2,6990 g/cm;
Berat = 45.000 g.

Jarak dari radial pusat teras (cm)	Reaktivitas (sen dolar)
0	- 1,8588
2	- 1,8559
4	- 1,8468
6	- 1,8307
8	- 1,8059
10	- 1,7707
12	- 1,7234
14	- 1,6624
16	- 1,5870
18	- 1,4969
20	- 1,3933
22	- 1,2779
24	- 0,2036
26	- 0,1673
28	- 0,1378
30	- 0,1136
32	- 0,0937
34	- 0,0772
36	- 0,0637
38	- 0,0525
40	- 0,0434
42	- 0,0360
44	- 0,0300
46	- 0,0254
48	- 0,0218
50	- 0,0192
52	- 0,0174

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari perhitungan dan percobaan yang telah dikerjakan diperoleh hasil seperti pada Tabel 2. Pada dasarnya perubahan reaktivitas lemah dapat diukur dengan mengamati periode dalam keadaan stabil dan tanpa mengalami perubahan posisi batang kendali di mana reaktor beroperasi kritis pada suatu tingkat daya yang kemudian mengalami gangguan oleh penyisipan sejumlah kecil bahan penyerap lemah pada pusat teras sebagai gangguan reaktivitas reaktor. Pada percobaan ini dilakukan dengan menyisipkan bahan Al dan Pb dengan berat tertentu di mana volumenya masih dapat dianggap titik gangguan sebagaimana syarat yang harus dipenuhi bahwa gangguan bersifat lokal. Seba-

gai pembandingan antara hasil perhitungan dengan hasil percobaan pada daerah pusat teras ($r_0 = 0$) untuk bahan penyerap Al dan Pb memiliki ralat yang cukup kecil masing-masing sebesar 7% dan 6,25% seperti pada Tabel 2. Hal ini sesuai dengan persamaan (12) di mana pada titik gangguan $r^0 = 0 \rightarrow \Delta\Phi = 0$ sehingga memiliki ketelitian yang cukup baik. Penentuan dan analisis gangguan reaktivitas lemah pada pusat teras reaktor ini (CT) dilakukan khususnya untuk estimasi baik secara kualitatif maupun kuantitatif gangguan reaktivitas yang timbul pada fasilitas iradiasi CT tersebut, dalam penggunaan reaktor riset.

KESIMPULAN

Teori gangguan satu kelompok berlaku untuk menentukan gangguan reaktivitas lemah dan bersifat lokal (non uniform) khususnya pada daerah pusat teras reaktor (CT). Selanjutnya dengan metode teori gangguan satu kelompok

tersebut dapat digunakan untuk menganalisis gangguan reaktivitas yang timbul dalam penggunaan fasilitas iradiasi Central Timble baik secara kualitatif maupun kuantitatif khususnya yang berasal dari bahan penyerap lemah dan non fisil.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lamarsh, J. R., Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison-Wesley, Reading, Mass U.S.A. (1966).
2. Prajoto, Pengantar Teori Reaktor, Teknik Nuklir Fak. Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta (1978).

DISKUSI

Harjoto :

Sebaiknya dalam makalah ilmiah tidak ada pernyataan yang dapat menimbulkan salah tafsir. Oleh karena itu pernyataan besar, kecil, baik, buruk, memuaskan dan lain-lain harus dihindari. Untuk ini pernyataan tersebut perlu diganti dengan besaran-besaran yang kualitatif dan disebutkan kondisi-kondisi yang tepat. Misalnya syarat agar hal ini berlaku (fluks isotropis) dan lain-lain. Perlu pula dihindari kesimpulan-kesimpulan yang didasarkan atas ekstrapolasi karena untuk kasus tertentu ekstrapolasi akan dapat menghasilkan simpangan yang besar.

Widarto :

Terimakasih atas saran Bapak

Margono :

Dalam percobaan hanya dilakukan 2 cuplikan. Sampai sejauh mana (ukuran, berat) dapat mempengaruhi reaktivitas? Berapa besarnya/beratnya sehingga cuplikan dianggap titik?

Widarto :

Pada prinsipnya variasi berat cuplikan akan memberikan gangguan reaktivitas yang berbeda-beda. Anggapan titik dilihat dari volumenya (bukan beratnya). Untuk volume 1 cm^3 masih dapat dianggap gangguan titik karena $\nabla \phi$ pada pusat teras pada ukuran volume tersebut masih dapat dianggap $\nabla \phi \longrightarrow 0$

K.Kamajaya:

1. Percobaan memakai Al 45 gram dan Pb 190 gram
 - a. Apakah hanya dilakukan satu kali percobaan?
 - b. Bagaimana kalau dilakukan variasi terhadap massa, apakah perubahan massa secara linier akan mengubah perolehan reaktivitas yang linier?
2. Bagaimana kira-kira ralat yang akan diperoleh bila perhitungan dilakukan memakai teori gangguan bukan satu kelompok? Barangkali ralatnya akan lebih kecil?

Widarto :

- 1 a. Ya.
 - b. Secara percobaan belum dilakukan variasi berat. Tetapi dapat dilihat dari perhitungan satu kelompok pada persamaan (16) dengan variasi berat akan memberikan reaktivitas gangguan yang berbeda.
2. Belum pernah dicoba. Tetapi dengan gangguan kecil dan lokal (titik) dapat ditentukan dengan teori gangguan satu kelompok.